

755



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA



EXAMENES PROFESIONALES
FACULTAD DE QUIMICA

Estudio Técnico Económico para Determinar la Alternativa más Rentable Entre la Rehabilitación de una Torre de Enfriamiento o su Sustitución por una Torre de Enfriamiento Nueva, en la Refinería Ing. Antonio M. Amor de Salamanca, Gto.

TESIS PROFESIONAL

Que para obtener el título de
INGENIERO QUIMICO
p r e s e n t a
ALEJANDRO ROJAS FLORES



México, D.F.

279260

2000



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



JURADO:

- | | |
|---------------------|---------------------------------|
| PRESIDENTE | PROF. JOSÉ LUIS PADILLA DE ALBA |
| VOCAL | PROF. JESÚS TORRES MERINO |
| SECRETARIO | PROF. RENE DE LA MORA MEDINA |
| 1er SUPLENTE | PROF. EMILIO M. PRADAL ROA |
| 2º SUPLENTE | PROF. JOSÉ LUIS LÓPEZ MARTÍNEZ |

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA: SUBGERENCIA DE INGENIERÍA DE PEMEX REFINACIÓN, BIBLIOTECA DEL INSTITUTO MEXICANO DEL PETRÓLEO Y LEVANTAMIENTOS DE CAMPO DEL SITIO DE LA OBRA.

ASESOR: PROF. RENE DE LA MORA MEDINA

SUSTENTANTE: ALEJANDRO ROJAS FLORES

DEDICATORIAS Y AGRADECIMIENTOS



Gracias a la vida, que me ha dado tanto.



Vuestros hijos no son vuestros.
Son hijos del anhelo de la Vida.
Son concebidos por medio de vosotros, mas no de vosotros.
Y no obstante vivir juntos no os pertenecen.

Podéis darles vuestro amor, mas no vuestros pensamientos.
Porque ellos poseen los *propios*.
Podéis albergar sus cuerpos, mas no sus almas.
Porque estas moran en la casa del mañana, la cual no podéis conocer, ni siquiera en vuestros sueños.
Podéis esforzaros por ser como ellos, mas no intentéis hacerlos como vosotros.
Por que la vida no retrocede ni se detiene con el ayer.
Sois el arco del cual vuestros hijos han sido disparados como saetas vivientes.
Dejad que vuestro encorvamiento en la mano del arquero sea por placer. (G.J.G.)

A Beto, a Mariana y a Max; mis hijos, quienes han dado una infinita alegría a mi vida.

A Beto, mi hijo, quien con determinación le arrancó a la vida un instante y que a su corta edad nos ha dado una gran enseñanza, demostrándonos que por grandes que sean las adversidades la vida es un don divino, que vale la pena; no importando las condiciones, limitaciones ni golpes que esta nos depare. A ti con todo el infinito amor que te tengo.

Manana y Max, mis hijos, desde que ustedes llegaron a mi vida, ésta encontró sentido; y ustedes han sido el ancla que me ha dado firmeza para soportar los embates de la vida y por duras que sean las tempestades, esta ancla no permitirá que navegue a la deriva porque ustedes son el faro que me oriente y mantiene a flote. A ustedes, con todo este especial e infinito amor que me han hecho sentir.



☺ ☺

A mis padres:

**Sra. María Flores Roldán.
Sr. Clemente Rojas Rubio.**

Quienes hicieron del trabajo arduo un pasatiempo y del sacrificio una afición, para que sus retoños pudieran alcanzar sus metas. A ellos con un especial respeto, admiración, cariño y agradecimiento.

☺ ☺

A mis hermanos:

Silbestre y Jesús

A ellos, gracias por su amistad, comprensión y apoyo incondicionales.

☺ ☺

A Ana, mi esposa.

Por su valiosa ayuda, apoyo y comprensión.

☺ ☺

A mi tía Elvira

Por su valiosa ayuda, apoyo y cariño que siempre ha tenido para con nosotros.

☺ ☺

Al honorable jurado.

Muy en especial al Ing. René de la Mora Medina.

Por su valiosa y desinteresada ayuda en la revisión y corrección de este trabajo.

☺ ☺

ÍNDICE

	Página
OBJETIVO	1
INTRODUCCIÓN	3
CAPÍTULO 1: GENERALIDADES.	7
CAPÍTULO 2: FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE TORRES DE ENFRIAMIENTO.	12
2.1 Enfriamiento por evaporación.	13
2.2 Humidificación.	14
2.3 Porcentaje de saturación.	16
2.4 Humedad relativa.	16
2.5 Entalpía.	17
2.6 Temperatura de bulbo húmedo.	18
2.7 Saturación adiabática.	22
2.8 Carta de humedad (psicrométrica).	25
2.9 Operación de humidificación.	28
2.10 Teoría de las torres de enfriamiento.	29
2.10.1 Torres de enfriamiento a contraflujo.	29
2.10.2 Métodos de solución numérica para una torre a contraflujo.	37
2.10.3 Integración numérica para una torre que opera a flujo cruzado.	40
2.11 Coeficiente característico del relleno, K_a .	45
2.12 Efecto de la temperatura del agua sobre el K_a característico del relleno.	46
2.13 Evolución y tipos de torres de enfriamiento.	49
2.14 Ventajas y desventajas de las torres de enfriamiento a contraflujo y a flujo cruzado.	52
2.15 Evolución de los materiales utilizados en la construcción de las torres de enfriamiento.	54
2.15.1 Paredes exteriores.	55
2.15.2 Chimenea del ventilador.	56
2.15.3 Eliminadores de arrastres.	56
2.15.4 Relleno o empaque.	56
2.16 Factores externos que afectan la operación y desempeño de las torres de enfriamiento.	57
2.16.1 Temperatura de bulbo húmedo.	58
2.16.2 Temperatura de bulbo seco.	59
2.16.3 Carga térmica.	59
2.16.4 Flujo, rango y acercamiento (approach).	60

2.16.5	Interferencia.	61
2.16.6	Recirculación.	62
CAPÍTULO 3: FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE ANÁLISIS DE INVERSIONES		66
3.1	Variables relevantes dentro de la ingeniería económica.	69
3.1.1	Intereses.	69
3.1.2	Flujo de efectivo.	70
3.1.3	Valor futuro de una serie uniforme de flujos de efectivo.	72
3.1.4	Valor presente de una serie uniforme de flujos de efectivo	73
3.2	Métodos básicos para la evaluación de la rentabilidad de las alternativas de un proyecto.	74
3.2.1	Método de la Tasa Interna de Rendimiento (T.I.R).	75
3.2.1.1	Proyecto con una tasa interna de rendimiento.	78
3.2.2	Método de la Tasa Explícita de Rendimiento sobre la reinversión (T.E.R).	78
3.2.3	Método del valor anual equivalente.	79
3.2.4	Método del valor presente neto.	81
3.2.4.1	Valor presente neto de la inversión total.	84
3.3	Depreciación.	84
CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE COSTOS DE ALTERNATIVAS DEL PROYECTO		88
4.1	Descripción y alcance del proyecto.	90
4.1.1	Costo de la obra de rehabilitación de la torre de enfriamiento 32E-1.	93
4.1.2	Nueva torre de enfriamiento.	97
4.1.3	Sistemas de distribución.	98
4.1.4	Obras de integración.	98
4.1.5	Urbanización del área.	99
4.2	Impacto de la rehabilitación en la producción y en los costos.	102
4.2.1	Integración.	110
4.3	Beneficios esperados.	112
CAPÍTULO 5: EVALUACIÓN FINANCIERA		119
5.1	Consideraciones.	120
5.1.1	Costo del proyecto.	120
5.1.2	Programa de construcción.	120
5.1.3	Disminución de la producción.	120
5.1.4	Impacto en los ingresos.	121
5.1.5	Factor de reposición.	121
5.1.6	Costos de operación.	122
5.1.7	Beneficios del proyecto.	124
5.1.8	Valor presente neto.	125
5.2	Flujo de efectivo.	126
5.3	Premisas de la evaluación financiera.	126

CAPÍTULO 6: ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.	128
CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES	135
CAPÍTULO 8: BIBLIOGRAFÍA.	138

OBJETIVO

OBJETIVO.

Producto de las modificaciones que se han tenido en las instalaciones de la refinería, mediante la implementación de secciones nuevas y plantas de procesamiento adicionales, aunado a la nula flexibilidad que se tiene en la actual torre de enfriamiento, ya que debido a su diseño original, es imposible que esta torre o alguna celda de las 15 con que cuenta actualmente pueda salir de operación para que se le dé mantenimiento; y como consecuencia de la necesidad del agua de enfriamiento como un servicio auxiliar indispensable para el funcionamiento de las plantas de proceso, surgió la necesidad de desarrollar este estudio, cuyo objetivo es determinar mediante un estudio técnico y económico cual es la alternativa más rentable entre la rehabilitación de una torre de enfriamiento existente (con más de 30 años en operación), estando esta en operación durante el proceso de rehabilitación o construir e integrar una nueva torre de enfriamiento de 8 celdas para dar servicio a las plantas de proceso que actualmente lo reciben de la torre de enfriamiento existente; y de esta forma eliminar los problemas continuos que se tienen con la actual torre de enfriamiento, que además de no cubrir la demanda de la carga térmica requerida actualmente, no cuenta con la flexibilidad necesaria para que se le pueda dar mantenimiento sin que se afecte la producción de las plantas.

Debido a que al mejorar la temperatura del agua de enfriamiento, se pretende obtener incrementos en el flujo de procesamiento de las plantas, pretendiéndose alcanzar las condiciones de diseño originales al eliminar la limitante ocasionada por la falta de enfriamiento.

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN.

Es innegable la gran importancia que tienen las torres de enfriamiento dentro de la industria de la transformación tanto en la rama industrial, petroquímica, de refinación y de generación de energía eléctrica (como en las plantas termoeléctricas y nucleoeeléctricas), puesto que a pesar de los avances e innovaciones tecnológicas, el agua de enfriamiento, aun no ha podido ser sustituida por otro sistema como medio eficaz de intercambio térmico, para satisfacer los requerimientos de remoción de calor durante las etapas de la transformación de las materias primas en productos terminados, o en su defecto para la condensación de vapor en las plantas termoeléctricas, para su recuperación y envío a tratamiento y posterior retorno a los generadores de vapor (calderas) para su reutilización en la generación de vapor para la alimentación a los sistemas de calentamiento o utilización en los turbogeneradores.

De hecho la utilización de agua de enfriamiento, acondicionada mediante torres de enfriamiento ha ido ganado terreno, puesto que en plantas y complejos industriales que contaban con circuitos de enfriamiento abiertos en los que originalmente se utilizaba directamente agua de río o mar para satisfacer sus requerimientos de enfriamiento, para su posterior descarga al medio ambiente, se han visto en la necesidad de cambiar a sistemas de enfriamiento cerrados (torres de enfriamiento) debido al continuo endurecimiento de las normas ecológicas, que al imponer sanciones económicas cada día más severas, han ocasionado que en la mayoría de los casos sea mas rentable la implementación de un sistema de enfriamiento cerrado (mediante torres de enfriamiento); puesto que en un momento dado las sanciones económicas ocasionadas por la contaminación térmica de los ríos o sistemas hidrológicos debidas a las descargas de el agua caliente a estos hacen costeable la implementación de un sistema cerrado de enfriamiento, debido a que estos efluentes descargados a la atmósfera se reducen considerablemente llegando a ser de un máximo del 3% del flujo circulante, traduciéndose en menores desembolsos por sanciones ecológicas por contaminación térmica.

Este endurecimiento de las leyes ecológicas, ha propiciado que se busquen mejoras en los diferentes tipos de relleno de las torres de enfriamiento, para que estos puedan operara sin problemas y eficientemente con altos contenidos de sales y sólidos disueltos y en suspensión en el agua circulante, sin que el relleno sufra atascamiento, y sin que el

área de contacto del relleno se vea afectada, permitiéndole en un momento dado operar eficientemente con aguas residuales.

Estas innovaciones en los rellenos así como los problemas operacionales que se tienen en las torres de enfriamiento que han crecido sin planeación, es el tema que ha dado lugar a que se realice este estudio, que permita en un momento dado comparar las ventajas y beneficios que se obtendrían tanto en la flexibilidad de operación como en el ahorro de energía derivados de una mayor eficiencia en el relleno que repercute en un menor requerimiento en la energía necesaria para la operación de los ventiladores para el manejo del aire necesario para el enfriamiento del agua.

Para cubrir los objetivos planteados, el presente trabajo está estructurado de la siguiente forma:

Capítulo 1, en el que se plantea una breve introducción a cerca de los alcances del presente trabajo, así como las razones que dieron origen al presente trabajo.

Capítulo 2, aquí se presenta una descripción de las teorías sobre las que se fundamenta el diseño de las torres de enfriamiento, se presenta una descripción de los tipos de torres de enfriamiento, así como un resumen de la evolución que han sufrido a lo largo del tiempo las torres de enfriamiento tanto en su diseño como en los materiales utilizados en la construcción de estas; así mismo se describen las variables que afectan operación de una torre de enfriamiento.

Capítulo 3, en este capítulo se presenta y se describe la importancia de los estudios económicos para determinar la rentabilidad y factibilidad de todo proyecto; así mismo se presenta un resumen de los métodos existentes para evaluar la rentabilidad de los proyectos, tales como el método de la tasa interna de rendimiento (T.I.R.); el método de la tasa explícita de rendimiento sobre la reinversión (T.E.R.) y el método del valor presente neto (V.P.N.).

Capítulo 4, en este capítulo se describe el alcance del proyecto y un resumen de la problemática que actualmente se tiene con la torre de enfriamiento actual y del impacto que ocasiona en la producción de todas las planta a las que les da el servicio, así mismo

se presenta el impacto económico que ocasiona este problema; del mismo modo se presentan los estimados del costo de la obra tanto para la construcción de la torre de enfriamiento nueva como para el caso de la rehabilitación de la torre existente.

Dentro de este mismo capítulo también se presentan los balances de materia de la producción y de los servicios de todas las plantas que reciben agua de enfriamiento de esta torre, tanto como para la producción actual, producción de diseño y el caso del incremento de la carga de procesamiento de estas plantas al contar con el adecuado suministro de agua de enfriamiento. Mostrándose los beneficios esperados de esta obra.

Capítulo 5, en este capítulo se presenta un resumen de toda las consideraciones realizadas para la estimación de los costos no vinculados directamente a la producción pero que impactan el costo final del proyecto. Además de que se presentan los resultados de los métodos utilizados para de terminar la rentabilidad del proyecto (T.I.R. y V.P.N.).

Capítulo 6, en este capítulo se muestra un análisis de sensibilidad del proyecto para determinar como se comportaría, en caso de que ocurrieran incrementos en el costo de la obra o disminución de los beneficios esperados o en su defecto que el proyecto se alargara.

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES

GENERALIDADES

Los servicios auxiliares como una parte importante del funcionamiento de los procesos, deben ser considerados desde la etapa de la concepción del proyecto de las instalaciones de procesamiento, de tal manera que la inversión que se realiza para contar con estos producen un valor agregado a la materia prima y las ganancias del producto terminado deben justificar la inversión total de la planta y sus servicios; ya que las instalaciones de servicio para las plantas de proceso no son proyectos que se deban justificar por su rentabilidad, puesto que son obras indispensables para la operación de las plantas de transformación de la materia prima en productos.

Dentro de la gran cantidad de servicios auxiliares con que debe contar toda planta de proceso, podemos decir que los más importantes y vitales para el adecuado funcionamiento y operación de la planta serían. Agua, Vapor, Combustible, Aire y Energía Eléctrica.

Agua: El agua es uno de los servicios auxiliares mas ampliamente utilizados en las plantas de proceso, y de acuerdo a su uso la podemos clasificar como: Agua de servicios, potable, contraincendio, para calderas, de enfriamiento y de proceso.

Vapor, este es otro servicio de vital importancia para la operación de las plantas de proceso; el cual de acuerdo a sus condiciones y uso lo podemos clasificar como vapor de alta presión, el cual generalmente es utilizado para la generación de energía eléctrica, y comúnmente en las refinerías se utiliza en el rango de 430 a 850 lb/pulg.² manométricas; vapor de media presión, este tipo de vapor generalmente se utiliza para el accionamiento de equipos mecánicos a través de turbinas de vapor y se maneja en el rango de 215 a 270 lb/pulg.² manométricas; y el vapor de baja presión, este vapor a diferencia de los dos anteriores no va sobre calentado, si no que se utiliza saturado como medio de calentamiento, y generalmente se utiliza a una presión de 50 lb/pulg.² manométricas.

Combustibles; dentro de los combustibles comúnmente utilizados los tenemos en estado sólido, líquido y gaseoso; pero en los procesos de las refinerías los combustibles generalmente utilizados son los combustibles líquidos (combustóleo y gasóleos) y los

combustibles gaseosos (gas natural y gas LP), aunque dentro de las plantas de generación de energía eléctrica se utiliza el carbón, el combustóleo y el gas natural.

Aire; este servicio se suministra en dos tipos, el aire de instrumentos y el aire de plantas; en ambos casos se suministra a una presión de 100 lb/pulg.² manométricas, el aire de instrumentos se utiliza para el accionamiento de los instrumentos de automatización y control, por lo que se debe suministrar limpio, seco y libre de aceite; en el caso del aire de plantas este es utilizado para limpieza y mantenimiento de la planta, por lo que debe suministrarse únicamente limpio.

Energía eléctrica; en las plantas de proceso y en refinerías este servicio es utilizado para: fuerza, alumbrado y control. Y en las refinerías lo encontramos en tres niveles de tensión. Alta tensión (13,800 volts), media tensión (4,160 volts) y baja tensión (220 y 127 volts); en general la corriente de alta y media tensión es utilizada para el accionamiento de motores eléctricos (fuerza) y la corriente de baja tensión se utiliza para el alumbrado, accionamiento de motores eléctricos menores a 1 hp y para control.

Existen sin embargo diferentes opciones para poder contar con los servicios que requiere una planta de proceso, desde pagar a terceros por ellos, hasta hacer una inversión de planta propia con la mayor sofisticación en facilidades de operación y control. Los estudios de inversión para plantas de servicios se deben enfocar a seleccionar la opción mas rentable por su menor costo de inversión y operación que satisfaga todos los requerimientos de la planta de proceso.

En la refinería de Salamanca Guanajuato se tiene el problema de que la torre de enfriamiento existente (denominada 32E-1), ha ocasionado problemas operativos y de mantenimiento, debidos a que por su diseño y a su mala planificación es imposible sacarla de operación para poder darle mantenimiento; lo que hace necesario contar con una torre que cuente con la flexibilidad para que se le pueda dar mantenimiento sin que se afecte la producción de las plantas; por lo que se tuvo la necesidad de analizar y elegir la alternativa más rentable entre la rehabilitación de la torre actual o la construcción de una torre nueva, con un diseño adecuado a las necesidades de las plantas, con la capacidad suficiente para satisfacer las necesidades de las plantas y con la flexibilidad suficiente para que pueda salir de operación sin afectar la operación de todas las plantas.

Para la determinación de las demandas de agua de enfriamiento de cada una de las plantas y de la relación operativa entre ellas (se consideraron los flujos de diseño de cada planta), se definieron por el personal de operación de la refinería, cinco grupos que operan en forma simultánea. De estos grupos, tres tienen una demanda entre 14,000 y 21,000 gpm, por lo que se eligieron como principales para ser abastecidos por una sección de la torre; los otros dos grupos con demandas de 2,800 y 7,300 gpm se dejarán con la opción de utilizar alternativamente dos secciones de la torre.

En el presente trabajo se va a comparar el costo de rehabilitar la actual torre de enfriamiento 32e-1 y acondicionarla para que pueda cumplir con los requerimientos actuales de las plantas a las que da servicio, contra el costo de construir una nueva torre de enfriamiento que dará el servicio esperado y contará con un diseño más acorde a las necesidades del conjunto de plantas que reciben el servicio de la torre actual.

Las plantas de proceso del área Bechtel en la refinería de Salamanca, Gto. reciben agua de enfriamiento de la torre 32e-1. el sistema de distribución de agua de esta torre, construida en 1967, ha tenido varias ampliaciones por la adición de diferentes plantas que se fueron instalando en áreas alejadas, aún cuando la capacidad de la torre se fue ampliando, el crecimiento no previsto de su sistema de tuberías ocasionó que las plantas de proceso no reciban, en muchos casos, las presiones diferenciales ni los flujos necesarios para cubrir adecuadamente sus cargas térmicas.

Por otra parte, el diseño de la torre 32e-1 se hizo tan limitado que no se dejó la flexibilidad necesaria para hacer un mantenimiento adecuado sin interrumpir totalmente el servicio, de manera que en esa torre es muy difícil (por no decir imposible), hacer limpieza del bacin de agua fría, o del cárcamo de bombeo. También el hecho de no haber incluido las mamparas entre celdas, origina la dificultad de que el paro de un ventilador causa doble efecto, ya que además de dejar de hacer circular el aire a través del relleno, permite la recirculación de aire saturado en los ventiladores vecinos.

Las dificultades de mantenimiento han llevado a tal deterioro la operación de la torre, que actualmente la temperatura de agua de salida está 6 °C mas caliente que la esperada de diseño, con las consecuentes afectaciones a los procesos.

La refinería planea eliminar los problemas descritos haciendo un cambio total, tanto de la torre como en los sistemas de distribución, de manera que también sea posible parar una parte de la torre de enfriamiento y del sistema de bombeo de esta sección cuando un grupo de plantas sale de operación.

Del estudio de las demandas de agua de enfriamiento de cada planta y de la relación operativa entre ellas, se definieron por el personal de operación de la refinería, cinco grupos que operan en forma simultánea. De estos grupos, tres tienen una demanda entre 14,000 y 21,000 gpm, por lo que se eligieron como principales para ser abastecidos por una sección de la torre; los otros dos grupos con demandas de 2,800 y 5,700 gpm se dejarán con la opción de utilizar alternativamente dos secciones de la torre.

El proyecto consiste en la construcción de una torre de enfriamiento normalizada, de tiro inducido, flujo cruzado, de doble entrada de aire, compuesta de ocho celdas independientes con capacidad de 10,000 gpm cada una, auxiliada en el manejo de aire por un ventilador por celda con capacidad de 125 hp, de flujo axial impulsado por motor eléctrico directamente acoplado en ángulo recto a un reductor de velocidad.

Para flexibilidad de operación, la torre contará con tres secciones independientes que darán servicio a sendos grupos de plantas. Cada sección contará con dos celdas y dos celdas de relevo permitirán la libranza de cualquiera de las celdas sin afectar los procesos de producción.

Con el propósito de reducir el número de usuarios por sistema de enfriamiento, se construirán tres sistemas de operación normal independiente, pero que contarán con las facilidades necesarias para intervenir con las mínimas afectaciones cualquier parte de los sistemas de enfriamiento para su rehabilitación o limpieza.

**CAPÍTULO 2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE TORRES DE
ENFRIAMIENTO.**

2.0 FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE TORRES DE ENFRIAMIENTO.

A fin de tener fundamentos sólidos para realizar un estudio técnico económico para determinar la alternativa más rentable entre rehabilitar una torre de enfriamiento existente (estando esta en operación) o sustituirla por una torre de enfriamiento nueva; es conveniente y apropiado realizar en forma breve una semblanza e introducción acerca de la teoría de las torres de enfriamiento, así como una descripción acerca de los tipos, características y factores que afectan el funcionamiento de estas.

2.1 ENFRIAMIENTO POR EVAPORACIÓN.

La evaporación como medio de enfriamiento del agua es un proceso totalmente extendido en torres de enfriamiento, las cuales son diseñadas para que sea expuesta la máxima área de transferencia de agua al máximo flujo de aire durante un periodo de tiempo lo más extenso posible.

El agua utilizada para la eliminación de calor de los procesos, químicos, petroquímicos y de generación de energía, es calentada al pasar por los equipos de intercambio térmico; para que esta agua pueda ser reutilizada como medio de enfriamiento es necesario eliminarle este calor absorbido en este proceso. Este enfriamiento se realiza al poner en contacto directo el agua con el aire; para que este proceso sea más eficiente es necesario aumentar el área de contacto entre la superficie del agua y el aire, acción que se logra mediante el rompimiento del chorro de agua mediante boquillas aspersoras (rociadoras), así como mediante la utilización de dispositivos que favorezcan el incremento de esta área empaque o relleno que aumenten el área de contacto entre el aire y el agua.

Este proceso de enfriamiento del agua es posible principalmente gracias a dos procesos de transferencia de calor comprendidos en:

- a) La transferencia de calor latente debido a la evaporación de una pequeña fracción del agua, este calor latente es tan grande, que la evaporación de una pequeña cantidad de agua representa grandes efectos de enfriamiento en el seno del líquido, por lo que

generalmente el régimen de transferencia de masa es pequeño (aproximadamente del 80 % de la transferencia de calor se debe al calor latente).

b) La transferencia de calor sensible debido a la diferencia de temperaturas entre el agua y el aire (aproximadamente el 20 % del calor transferido se debe al calor sensible); por lo que podemos afirmar que el enfriamiento de agua realizado mediante torres de enfriamiento se trata de un proceso simultáneo de transferencia de calor y de masa, sin que se tenga una fuente externa de suministro de energía; dándose en la torre de enfriamiento dos fenómenos en los dos fluidos que intervienen en este proceso de enfriamiento del agua, uno es el enfriamiento del agua misma por la evaporación de una fracción del agua y el segundo es la humidificación del aire que se pone en contacto con el agua, al absorber la fracción de agua evaporada del seno del flujo de agua. Por lo que la capacidad de eliminación de calor de una torre de enfriamiento por flujo de aire circulado, depende de la temperatura del aire y de su contenido de humedad. Esta evaporación de una fracción del agua circulante, es lo que hace posible que el agua pueda ser enfriada por debajo de la temperatura de bulbo seco del aire.

2.2 HUMIDIFICACIÓN.

En todos los casos donde exista transferencia de masa, debe existir transferencia de calor. Cuando se transfiere un componente de una fase gaseosa a una fase líquida, se desprende el calor latente asociado con la condensación, donde la temperatura interfasial se ajustará hasta que, para el estado estable, la proporción de transferencia de calor se equilibre la transferencia de calor asociada a la transferencia de masa. Siendo en estos fenómenos donde ocurre una transferencia de masa de la fase líquida a la fase gaseosa, la velocidad de transferencia de calor una variable importante para el control de la velocidad de humidificación; y en estos casos, limitará en forma significativa la proporción a la cual pueda transferirse la masa.

Estas operaciones, en las cuales la transferencia de masa y de calor influyen en la velocidad de la humidificación y la deshumidificación, constituyen los casos más sencillos, siendo también la aplicación más directa de la teoría, y en estas operaciones

solo están involucradas dos componentes y dos fases. Siendo en el caso de las torres de enfriamiento la fase líquida el agua y la fase gaseosa el aire en el que parte de la fase líquida se encuentra presente en el estado de vapor.

En general la aplicación de los procesos de humidificación se tiene en el control de la humedad presente dentro de un espacio, para enfriar y recuperar agua al ponerla en contacto con el aire; teniéndose en esta operación un intercambio de masa y de energía. la dirección de la transferencia de masa y de calor está determinada por la relación de la humedad y la temperatura del gas de la fase gaseosa a la entrada y la temperatura del líquido de contacto, siendo en el caso de enfriamiento de agua, la que transfiere tanto la masa como la energía para cederla a la atmósfera vía el aire que se pone en contacto con el agua.

Como anteriormente se menciona, en los procesos de transferencia de masas y de calor, durante la transferencia simultanea de ambos, la dirección de esta transferencia y su amplitud se encuentran controladas por las condiciones de equilibrio hacia las cuales tiende la transferencia. Por lo que en realidad se tiene un equilibrio de fases.

básicamente las ecuaciones que relacionan y determinan el grado de saturación se basan en la consideración de que tanto el vapor de agua como el aire siguen el comportamiento del gas ideal, por lo que se puede predecir su comportamiento con las leyes de Raoult y de Dalton, quedando definida la saturación como:

$$p_a = P_t y_s = P_a x \quad (\text{Ec. 2.1})$$

del mismo modo cuando las operaciones implican cambios en el contenido de vapor (en la mezcla vapor-gas) sin cambios en el contenido de gas, la relación de la masa de vapor/masa de aire seco se define como la *humedad absoluta* H, que se define como:

$$H = \frac{P_{\text{agua}}}{P_{\text{aire}}} = \frac{P_{\text{agua}}}{P_t - P_{\text{aire}}} \frac{\text{moles de agua}}{\text{moles de aire}} \quad (\text{Ec. 2.2})$$

Y cuando la presión parcial p del vapor de agua en el aire, a una temperatura dada, es igual a la presión de vapor del agua p_v , a la misma temperatura, el aire está saturado y la *humedad absoluta se designa como humedad de saturación* H_s .

donde:

- H = Humedad absoluta en libras de vapor de agua por libras de aire.
 p_{agua} = Presión parcial del vapor de agua en atm.
 p_{aire} = Presión parcial del aire en atm.
 P_t = Presión total en atm.
 p_a = Presión parcial del componente condensable en la fase gaseosa.
 y_s, x = Fracción molar de saturación del componente condensable en el vapor en equilibrio y en la fase líquida respectivamente.
 P_s = Presión de vapor del componente condensado.

Por otro lado, si la presión del vapor en la mezcla vapor-gas es menor que la presión de vapor de equilibrio del líquido a la misma temperatura, hablamos de una mezcla no saturada.

2.3 PORCENTAJE DE SATURACIÓN.

El porcentaje de saturación o porcentaje de humedad absoluta, se define como la humedad absoluta respecto a la humedad de saturación o la razón de la humedad absoluta a la humedad de saturación, y está definida por.

$$\%H = \frac{100 H}{H_s} = \frac{100 p (P - p_s)}{[p_s (P - p)]} = \frac{100 H}{H_s} \quad (\text{Ec. 2.3})$$

2.4 HUMEDAD RELATIVA.

Para el caso de las mezclas vapor de agua-aire, si la presión parcial del vapor de agua es inferior a la presión de equilibrio del líquido a la misma temperatura, la mezcla no está saturada.

La humedad relativa se define como la presión parcial del vapor de agua en el aire a las condiciones de temperatura y presión dadas, dividida entre la presión del vapor de agua a la temperatura dada (cuando la fase está saturada) y que se define como:

$$H_R = \frac{100 p}{p_s} = \frac{100 H}{H_s} \quad (\text{Ec. 2.4})$$

La humedad relativa, es la medida normalmente utilizada para reportar los datos climatológicos.

De las ecuaciones 2.3 y 2.4, claramente se puede apreciar que la saturación por ciento es igual a la saturación relativa multiplicada por $(1 - H_s) / (1 - H)$. Y puesto que $H_s > H$, la saturación por ciento será siempre menor que o en el límite igual a la saturación relativa por ciento.

2.5 ENTALPÍA.

Por otro lado si consideramos que para la mezcla aire vapor de agua y a presión constante, tomando en cuenta que se parte del líquido saturado pasando por el vapor saturado hasta alcanzar las condiciones de la temperatura de la mezcla, por lo que se tienen que considerar tanto el calor latente de vaporización como el calor sensible para alcanzar las condiciones finales de la mezcla; de forma tal que la entalpía queda definida por las siguientes relaciones:

Entalpía del aire.

$$i_G = C_G (T_G - T_0) \quad (\text{Ec. 2.5})$$

Para el vapor de agua, es necesario tomar en cuenta que este tiene que pasar de la fase líquida a vapor y del vapor saturado pasar a las condiciones de la mezcla aire vapor de agua, por lo que la entalpía del vapor de agua queda definida como.

$$i_L = C_L (T_G - T_0) + \lambda_0 \quad (\text{Ec. 2.6})$$

En donde λ_0 corresponde al calor latente de vaporización a la temperatura de referencia, T_G corresponde a la temperatura de bulbo seco de la mezcla y T_0 corresponde a la temperatura de referencia de la mezcla vapor aire y generalmente corresponde a 32 °F para ambos componentes.

De forma tal que la entalpía de la mezcla aire-vapor de agua quedará definida como:

$$i_{LG} = C_G (T_G - T_0) + H [C_L (T_G - T_0) + \lambda_0] = C_{LG} (T - T_0) + H \lambda_0 \quad (\text{Ec. 2.7})$$

En donde el término C_{LG} se denomina calor húmedo y corresponde a la capacidad calorífica del aire seco más la capacidad calorífica del vapor contenido en el aire y es igual a $C_{LG} = C_G + H C_L$.

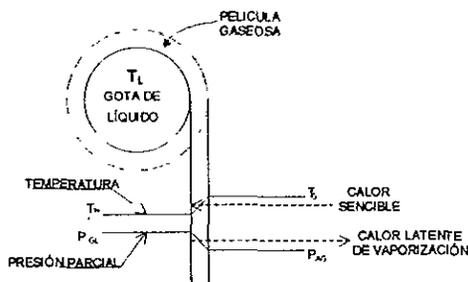
2.6 TEMPERATURA DEL BULBO HÚMEDO.

La temperatura de bulbo húmedo es la temperatura estacionaria alcanzada por una pequeña cantidad de líquido que se evapora en una gran cantidad de mezcla vapor-aire no saturada; en otras palabras o también se define como la temperatura de equilibrio dinámico obtenido en una superficie de agua cuando la velocidad de transferencia de calor por convección, a la misma, es igual que la velocidad de transferencia de masa que se aleja de tal superficie.

Si el líquido inicialmente se encuentra a una temperatura mayor que el punto de rocío del gas, la presión de vapor del líquido en la superficie de la gota será mayor que la presión parcial de vapor en el gas, por lo que el líquido se evaporará difundiéndose dentro del gas. Al darse esta evaporación del líquido, este vapor transportará consigo el calor latente asociado a este. El calor latente requerido para la evaporación será suministrado al principio a expensas del calor sensible del seno o gota del líquido, lo que ocasionará el enfriamiento de este líquido.

En el momento en que la temperatura del líquido se reduce por debajo de la temperatura de bulbo seco del aire, en este momento el calor fluirá desde el gas hacia el líquido, teniéndose una velocidad de transferencia de calor mayor, cuando el gradiente de temperaturas sea mayor. En el momento en que la velocidad de transferencia de calor desde el gas al líquido iguala la velocidad de calor requerido por la evaporación del líquido, en este momento la transferencia de calor será cero (estado estable) y la temperatura del líquido permanecerá constante a un valor por debajo de la temperatura de bulbo seco del aire; la temperatura de bulbo húmedo (t_w) es la temperatura a la que se alcanza el estado estable de transferencia de calor cuando se expone una gota de líquido a una corriente de aire que se mueve rápidamente.

La temperatura de bulbo húmedo junto con la temperatura de bulbo seco (temperatura del aire), es uno de los métodos más antiguos y más comúnmente utilizados para medir la humedad de una corriente gaseosa.



FIGUR No. 2.1.- REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA TEMPERATURA DE BULBO HÚMEDO.

Para las condiciones de estado estacionario y en un régimen donde la cantidad de aire comparada con la gota de líquido es tan grande que la evaporación de una pequeña cantidad del líquido de la gota no modifica en forma apreciable la humedad del aire (el cambio de la temperatura de bulbo seco del aire es despreciable); de manera que la cantidad de calor transferido a la gota de líquido es:

$$q = h_G A (T_1 - T_L) \quad (\text{Ec. 2.8})$$

y puesto que la proporción de transferencia de masa desde la gota de líquido hacia la corriente de aire es pequeña, esta transferencia de masa se define como:

$$N_A = K_G A (H_G - H_L) \quad (\text{Ec. 2.9})$$

En donde los subíndices L y G se refieren a la temperatura de bulbo húmedo de la superficie de la gota y la temperatura del aire y h_g representa los coeficientes de transferencia de calor por convección y por radiación (h_c y h_r) hacia la superficie de la gota en $\text{btu}/(\text{h ft}^2 \text{ } ^\circ\text{F})$ y K_G representa el coeficiente de transferencia de masa en $\text{lb}/(\text{h ft}^2 \text{ atm})$; en donde se tiene que la cantidad de calor transferido a la superficie de la gota por radiación está definido por

$$q_r = h_r A (T_G - T_L) \quad (\text{Ec. 2.10})$$

Para el estado estable, todo el calor transferido hacia la gota de agua, es utilizado para vaporizar N_a moles de agua líquida.

$$q = -N_a \lambda_L \quad (\text{Ec. 2.11})$$

En donde λ_L representa el calor latente de evaporación del agua líquida en btu/lb . por otro lado, si consideramos que en la condición estable, la cantidad de calor sensible hacia la gota de agua, es igual a la cantidad de calor latente transportado por la masa de agua N_a desde el censo de la gota de agua, e igualando y combinando las ecuaciones 2.5, 2.6 y 2.8 tenemos

$$(h_c + h_r) A (T_G - T_L) = -K_G A (H_G - H_L) \lambda_L \quad (\text{Ec. 2.12})$$

y puesto que la transferencia de calor y de masa se da en el área de la gota de agua, entonces el área es la misma en ambos casos, quedando.

$$T_G - T_L = \frac{-K_G \lambda_L}{(h_c + h_r)} (H_G - H_L) \quad (\text{Ec. 2.13})$$

Pero si consideramos que en el caso de la termometría de bulbo húmedo, el coeficiente de radiación es mínimo cuando la velocidad del aire que se tiene en contacto con la gota de agua se mantiene alta (mínimo de 15 a 20 pies/seg en el caso aire vapor de agua), la ecuación 2.13 se reduce a la siguiente expresión.

$$T_G - T_L = \frac{-K_G \lambda_L}{h_c} (H_G - H_L) \quad (\text{Ec. 2.14})$$

para poder conocer la humedad que se tiene en el medio, a partir de la temperatura de bulbo húmedo, es necesario conocer los valores de la relación psicrométrica K_G/h_c ; la cual es obtenida en condiciones de flujo turbulento. y en cuyo caso los datos experimentales considerando el paso del aire a través de las paredes húmedas de un cilindro (como en el caso de un termómetro de bulbo húmedo), los experimentos han arrojado que la relación psicrométrica (h_c/K_G) para el aire es

$$\frac{h_c}{K_G} = 0.294 S_c^{0.56} \quad (\text{Ec. 2.15})$$

Por otro lado experimentalmente se ha comprobado que para los sistemas aire vapor de agua, la relación psicrométrica (h_c/K_G) es aproximadamente igual a C_s ó ($h_c/K_G C_s$)= 1 igualdad que se conoce como la relación de Lewis, la cual es valida para regímenes completamente turbulentos.

2.7 SATURACIÓN ADIABÁTICA.

Para los procesos de humidificación de aire, en los que se pone en contacto el aire con el líquido, para saturar el aire como resultado de la difusión y de la transferencia de calor entre el aire y el líquido, por lo que el aire sale a condiciones de humedad y temperatura diferentes a las que entró. y puesto que el sistema se encuentra aislado de los alrededores, no existe intercambio de calor, como se muestra en la figura no 2.2.

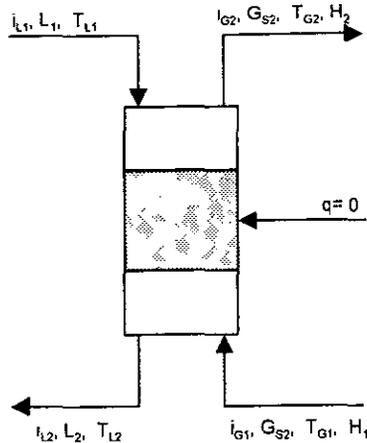


FIGURA No. 2.2.- PROCESO DE HUMIDIFICACIÓN ADIABÁTICA

Un balance general del sistema queda de la siguiente forma.

$$(L_2 - L_1) = G_S (H_2 - H_1) \quad (\text{Ec. 2.16})$$

Y el balance de entalpía.

$$L_2 i_{L2} - L_1 i_{L1} = G_S i_{G1} - G_S i_{G2} \quad (\text{Ec. 2.17})$$

puesto que en el estado estable $T_{L1} = T_{L2}$, y si el líquido se recircula, no habrá diferencia de temperaturas entre el aire y el líquido, por lo que no habrá transferencia de calor

sensible entre las fases, siendo el único efecto del líquido sobre la torre, es que parte del líquido se evapora y pasa a la corriente de aire, y la entalpía del líquido se mantendrá constante, con lo que la ecuación 2.17 se reduce a:

$$i_L (L_2 - L_1) = G_S (i_2 - i_1) \quad (\text{Ec. 2.18})$$

sustituyendo la ecuación 2.16 en la ecuación 2.18 para eliminar L

$$i_L (H_2 - H_1) = i_2 - i_1 \quad (\text{Ec. 2.19})$$

Del mismo modo la entalpía puede expresarse en términos del calor latente y del calor húmedo, quedando expresada de la siguiente manera.

$$C_L (T_{L2} - T_0) (H_2 - H_1) = [C_{LG2}(T_{V2} - T_0) + \lambda_0 H_2] - [C_{LG1}(T_{V1} - T_0) + \lambda_0 H_1] \quad (\text{Ec. 2.20})$$

Si consideramos que la torre tiene la altura suficiente para que las fases en contacto alcancen el equilibrio, con lo que el aire circulante quedaría saturado, de forma tal que ambas fases alcanzarían las mismas temperaturas y el gas se humidifica por evaporación del líquido y se enfría, con lo que las temperaturas serían las mismas $T_{L2} = T_{L1} = T_{V2} = T_2$. La temperatura en el domo de la torre (T_2) sería entonces la temperatura adiabática de saturación y Y_2 sería la humedad del gas a T_2 y la temperatura de la fase gaseosa en el fondo de la torre (T_{G1}) se puede designar como T_1 , por lo que al aplicar estas consideraciones la relación 2.20 quedaría de la siguiente manera

$$C_L (T_2 - T_0) (H_2 - H_1) = [C_{LG2}(T_2 - T_0) + \lambda_0 H_2] - [C_{LG1}(T_1 - T_0) + \lambda_0 H_1] \quad (\text{Ec. 2.21})$$

si redefinimos el calor húmedo considerando las condiciones de la mezcla aire vapor de agua a la entrada y a la salida de la torre de enfriamiento, con lo que nos quedaría como

$$C_{LG2} = C_{LG1} - H_1 C_G + H_2 C_G \quad (\text{Ec. 2.22})$$

con lo que al combinar las ecuaciones 2.20 y 2.22 nos queda

$$C_L (T_2 - T_0) (H_2 - H_1) = [C_{LG2}(T_2 - T_0) - H_1 C_G(T_2 - T_0) + H_2 C_G(T_2 - T_0) + \lambda_0 H_2] - [C_{LG1}(T_1 - T_0) + \lambda_0 H_1] \quad (\text{Ec. 2.23})$$

rearrreglando términos

$$C_{LG}(T_2 - T_1) = (H_2 - H_1)[C_L(T_2 - T_0) - \lambda_0 C_G(T_2 - T_0)] \quad (\text{Ec. 2.24})$$

de la ecuación 2.24, se puede notar que el término entre corchetes es igual a λ_2 , con lo que esta relación se reduce al siguiente término

$$C_{LG1}(T_2 - T_1) = \lambda_2 (H_1 - H_2) \quad (\text{Ec. 2.25})$$

puesto que los términos T_2 y Y_2 son las condiciones para la temperatura adiabática de saturación, la ecuación 2.25 se puede expresar en los siguientes términos

$$C_{LG1}(T_{SA} - T_1) = \lambda_{SA} (H_1 - H_2) \quad (\text{Ec. 2.26})$$

rearrreglando términos tenemos que

$$(H_2 - H_1) = (C_{LG1}/\lambda_{SA})(T_{SA} - T_1) \quad (\text{Ec. 2.27})$$

Esta ecuación representada en un diagrama psicrométrico, corresponde a la "curva de saturación adiabática" relaciona la temperatura y la humedad de un gas para cualquier condición de entrada y las condiciones correspondientes para el mismo gas en su temperatura adiabática de saturación. Para cualquier mezcla vapor aire, hay una curva de

saturación adiabática T_{SA} , de tal modo que si se le pone en contacto con líquido a la temperatura T_{SA} , el gas se humidificará y se enfriará

Como anteriormente se indicó y de acuerdo a la relación de Lewis y como se ha demostrado experimentalmente, que para los sistemas aire-agua se tiene que $(h_o/K_G C_s)$ es aproximadamente igual a C_s ó $(h_o/K_G C_s) = 1$, lo cual conduce a casi una igualdad entre la temperatura de saturación adiabática y de bulbo húmedo, incrementándose la diferencia entre ambas al incrementarse la humedad. y para otros sistemas diferentes al de aire-agua, esta igualdad no se cumple.

2.8 CARTA DE HUMEDAD (O PSICROMÉTRICA).

Esta carta muestra gráficamente los conceptos antes mencionados, este tipo de gráficas se aplican a una presión fija. y debido a la frecuencia en la utilización de los sistemas aire-agua, se cuenta con gráficos muy completos (carta grosvenor). En estas cartas se puede obtener información sobre la humedad relativa o porcentaje de saturación, volumen húmedo, entalpía total y cantidades totales como las temperaturas de bulbo húmedo y de bulbo seco. Otra característica de este diagrama es que todas las cantidades están representadas en función de la temperatura. Para el caso de la entalpía las condiciones utilizadas fueron aire gaseoso y agua líquida saturada a 32 °F, de forma tal que este gráfico puede utilizarse en forma conjunta con tablas de vapor de agua.

Todas las ecuaciones representativas de las curvas (relaciones psicrométricas) para el sistema aire-agua, básicamente se resumen en las siguientes.

$$M_A \approx 18.02 \text{ PESO MOLECULAR DEL AGUA}$$

$$M_G \approx 28.87 \text{ PESO MOLECULAR DEL AIRE}$$

$$H \approx 0.622 \frac{P_{H_2O}}{1 - P_{H_2O}} \text{ LB VAPOR DE AGUA / LB AIRE}$$

$$H_S \approx 0.622 \frac{P_{H_2O}}{1 - P_{H_2O}} \text{ LB VAPOR DE AGUA / LB AIRE}$$

$$V_H \approx (0.0252 + 0.0405H) (T_G + 460) \text{ PIE}^3 \text{ MEZCLA / LB AIRE}$$

$$C_S \approx 0.24 + 0.45H \text{ BTU PARA MEZCLA / LB AIRE}$$

$$T_0 = 32 \text{ }^\circ\text{F}$$

$$\lambda_0 = 1075.8 \text{ BTU/LB, CALOR LATENTE DE VAPORIZACIÓN DEL AGUA A } 32 \text{ }^\circ\text{F}$$

$$i = (0.24 + 0.45H) (T_G - 32) + 1075.8H; \text{ ENTALPÍA RELATIVA, BTU PARA MEZCLA AIRE REFERIDA PARA AIRE GASEOSO Y AGUA LÍQUIDA SATURADA A } 32 \text{ }^\circ\text{F}$$

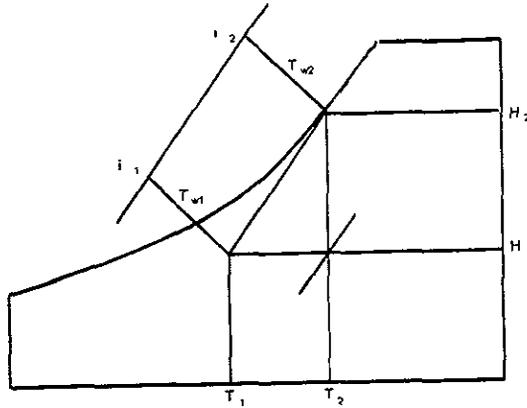


FIGURA No. 2.4: REPRESENTACIÓN DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO EN UN DIAGRAMA PSICROMÉTRICO

2.9 OPERACIONES DE HUMIDIFICACIÓN.

En un proceso de enfriamiento de agua, el agua caliente se pone en contacto con una mezcla aire-vapor de agua, en donde la masa y el calor se transfieren hacia la fase gaseosa. Con lo que el enfriamiento se produce como resultado de la transferencia de calor sensible y por la evaporación del líquido. En este tipo de operación, la transferencia de masa básicamente está limitada en dirección hacia la fase gaseosa y para el caso de una torre de enfriamiento se trata de un proceso adiabático, puesto que no existe intercambio de calor entre el sistema y este intercambio solo se tiene entre el aire y el líquido se encuentran en contacto.

Del mismo modo dentro del proceso de enfriamiento en una torre pueden encontrarse casos en donde el calor sensible y el calor latente se transfieren en direcciones opuestas. Lo cual comúnmente ocurre en la parte inferior de la torre de enfriamiento, en donde el agua se enfría por debajo de la temperatura del gas. Este sobre enfriamiento se debe a que la transferencia del calor latente proporciona una cantidad de calor superior a la transferencia debida a la transferencia de calor sensible.

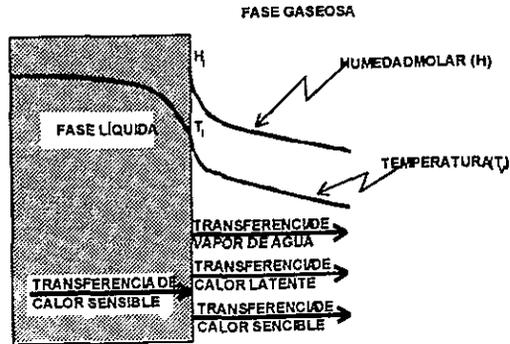


FIGURA No. 2.5: CONDICIONES DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO.

2.10 TEORÍA DE LAS TORRES DE ENFRIAMIENTO.

Los métodos para la predicción del comportamiento de una torre de enfriamiento fueron desarrollados hace muchos años. Sin embargo, dos factores han limitado su utilización:

1. La ausencia de datos de los coeficientes de transferencia de masa para los diferentes rellenos disponibles comercialmente.
2. Las suposiciones utilizadas en la derivación de los métodos clásicos, lo cual puede limitar la exactitud de las predicciones que se hacen al utilizar estos métodos.

De acuerdo a lo determinado por Baker y Shryrock, en base a la teoría de Merkel para la representación de las torres de enfriamiento a contraflujo y a flujo cruzado.

2.10.1 TORRES DE ENFRIAMIENTO A CONTRAFLUJO.

Si consideramos que una torre de enfriamiento a contraflujo que tenga un área plana de 1 FT^2 , un volumen de enfriamiento V , conteniendo una superficie interfacial aire-agua " a " en FT^2 por FT^3 de relleno, un flujo de agua, " L " (en lb/hr); y un flujo de aire, " G " (en lb/hr). En donde el proceso de transferencia de masa y calor sensible se muestra gráficamente en la figura no. 2.6. en donde la corriente de agua que fluye sobre el relleno, se encuentra a

la temperatura T_L , la cual es rodeada por la corriente de aire a la temperatura de bulbo seco T_a , con una entalpía i_a , y una humedad relativa H_R .

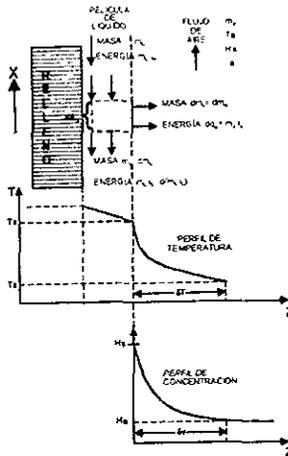


FIGURA No. 2.6: RELACIÓN DE TRANSFERENCIA DE MASA Y CALOR ENTRE EL AGUA, LA PÉLCULA INTERFASIAL Y EL AIRE

Suponemos que en la interfase el aire se encuentra saturado y tanto el agua como el aire tienen una temperatura intermedia T_s , entalpía i_s y una relación de humedades H_s . Si suponemos un calor específico constante para el agua ($C_L = 1.0 \text{ btu/lb } ^\circ\text{F}$), tenemos que la transferencia de calor sensible del agua a la interfase dentro de un diferencial de volumen de la torre es:

$$dq = L C_L dT_L = H_L a (T_L - T_s) dV \quad (\text{Ec. 2.28})$$

en donde tenemos la siguiente nomenclatura:

q = Flujo de calor transferido, desde el seno de la corriente de agua a la interfase aire-agua, btu/h.

h_L = Coeficiente de transferencia de calor, desde el seno de la corriente de agua a la interfase aire-agua, btu/hr ft² °F).

- dq_a = Flujo transferido de calor sensible de la interfase a la corriente de aire, btu/h.
- h_a = Coeficiente total de transferencia de calor sensible, entre la interfase y la corriente de aire.
- K_w = Coeficiente de transferencia de masa, para la transferencia de vapor de agua desde la interfase hacia la corriente principal de aire, lb/(h ft²), (lb de vapor de agua/lb de aire seco).
- H_s = Humedad relativa del aire saturado a la temperatura de la superficie del agua, lb vapor /lb de aire.
- H_a = Humedad relativa de la corriente de aire.

La consideración que generalmente se hace es que la temperatura interfasial es igual a la temperatura de la corriente principal de agua. La transferencia de calor sensible desde la superficie del agua al aire se define como.

$$dq_a = h_a a (T_s - T_a) dV \quad (\text{Ec. 2.29})$$

mientras que la difusión del vapor de agua desde la película al aire es

$$dm_v = K_w a (H_s - H_a) dV \quad (\text{Ec. 2.30})$$

si consideramos que λ_s es el calor latente de vaporización del agua a la temperatura de la interfase, por lo que tenemos que el flujo de calor latente transferido es $\lambda_s dm_v$.

Y el flujo total de calor transferido desde el agua al aire se define como.

$$\begin{aligned} dq_T &= dq_a + i_v dm_v = h_a a (T_s - T_a) dV + \lambda_s K_w a (H_s - H_a) dV \\ &= K_w a dV (h_a / C_p K_w) C_p (T_s - T_a) + \lambda_s (H_s - H_a) \end{aligned} \quad (\text{Ec 2.31})$$

Merkel y Lichtenstein utilizaron la relación de Lewis

$$Le = \frac{h_a}{C_{LG}K_W} = 1 \quad (\text{Ec. 2.32})$$

En donde C_h se define como el calor específico del aire húmedo en $\text{btu}/(\text{lb de aire seco } ^\circ\text{F})$, lo cual es prácticamente cierto para el vapor de agua en aire; al combinar el coeficiente de transferencia de masa y el calor sensible en un coeficiente total basado en la diferencias de entalpías como el medio motriz.

De forma tal que si despreciamos los términos correspondientes al calor sensible en comparación con el calor latente, así mismo si consideramos que el régimen de transferencia de masa es pequeño como generalmente sucede; la ecuación 30 se puede reducir a los siguientes términos:

$$LC_L dT_L = G di = K_W a(i_s - i_a) dV \quad (\text{Ec. 2.33})$$

Donde i_s = entalpía del aire saturado a la temperatura del agua.

i_a = Entalpía del aire en el mismo punto de la torre.

si consideramos que esta transferencia de energía tiene lugar en una torre de enfriamiento a contraflujo (ver la figura no. 2.7), el volumen sobre el cual se desarrollará la integración es la altura de la torre, y el diferencial de volumen dV es simplemente el área de la sección transversal de la torre multiplicada por el número de incrementos del diferencial de la altura dY . Y si suponemos que la torre tiene un área unitaria de la sección transversal, digamos 1 FT^2 , entonces L viene a ser L'' (flujo por unidad de área), y la ecuación 2.33 se redefine como.

$$L''C_L dT = K a(i_s - i_a) dY \quad (\text{Ec. 3.34})$$

por lo tanto $l/(\text{área de la sección transversal de la torre}) = L''$ Y $V/(\text{área de la sección transversal de la torre}) = Y$.

Con estas suposiciones, los flujos de las corrientes de agua y de aire (L y G respectivamente), representan los flujos por unidad del área de la sección transversal.

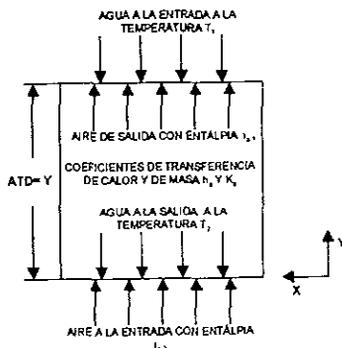


FIGURA No. 2.7: CONFIGURACIÓN DE UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO A CONTRAFLUJO.

Integrando la ecuación no. 2.34 obtenemos:

$$\frac{K a Y}{L''} = \int_{T_1}^{T_2} C_w dT / (i_s - i_a) \equiv \int_{T_{AF}}^{T_{AC}} \frac{C_L dT}{(i_s - i_a)} \quad (\text{Ec. 2.35})$$

en donde:

T_{AC} = Temperatura del agua caliente dentro de la torre.

T_{AF} = Temperatura del agua que sale de la torre.

Para la comprensión del de la ecuación 2.35, es conveniente utilizar la representación gráfica de este tipo de torres de enfriamiento, para una mejor comprensión del proceso de transferencia de masa/energía en una torre de enfriamiento y los métodos utilizados para predecir su capacidad. La ecuación 2.35, puede ser utilizada para evaluar el rango de temperatura ($T_{AC} - T_{AF}$), a través del cual el agua puede ser enfriada en una torre de altura -Y- si el flujo de agua es L y el coeficiente de transferencia de masa (por unidad de

volumen) dentro de la torre de enfriamiento es Ka . la integración requiere información sobre:

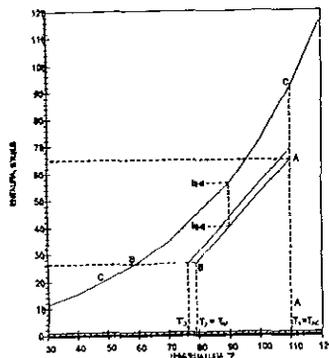
- 1) La función que relacione la entalpía del aire saturado y su temperatura.
- 2) Los flujos y su dirección del aire y del agua.

Como se muestra en la figura no. 2.7, la relación entre la entalpía del aire (i_a) y la temperatura del agua (T), puede derivarse del balance de energía en cualquier nivel de la torre y en la parte superior o el fondo de la torre de donde obtenemos

$$L'' C_L (T_1 - T) = G'' (i_{a1} - i_a) \quad (\text{Ec. 2.36})$$

Donde G'' = Flujo del aire por sección transversal de la torre.

La ecuación no. 2.36 es representada por la línea A-B en la gráfica de entalpía del aire contra la temperatura del agua (figura no. 2.8). Esta es una línea recta siempre y cuando L''/G'' sea constante a través de la torre, pero en realidad L''/G'' no es constante debido a que parte del agua se evapora y se incorpora a la corriente de aire. Sin embargo, Merkel supuso que estos pequeños cambios son despreciables y considera que la línea es una recta. De esta manera, podemos representar a la entalpía del aire y la temperatura del agua en cualquier punto de la torre, mediante la línea "A-B"; donde "A" representa las condiciones en lo alto de la torre y "B" representa las condiciones en el fondo de la torre.



**FIGURA 2.8:
REPRESENTACIÓN
GRÁFICA DE UNA TORRE
A CONTRAFLUJO**

La relación entre la entalpía del aire saturado y su temperatura es representada en la figura no. 2.8 por la curva C-C. En cualquier punto de la torre, el calor y el vapor de agua

son transferidos al aire debido a la diferencia en la entalpía del aire en la superficie del agua (representada por la curva C-C de entalpía del aire saturado) y en la corriente principal del aire (representada por la línea A-B). Así la fuerza impulsora en cualquier punto de la torre queda definida por $(i_s - i_a)$ y es la distancia vertical entre A-B y C-C. Del mismo modo podemos representar a la integral de la ecuación no. 2.35, $(i_s - i_a)^{-1}$, por la curva inferior que se muestra en la figura no. 2.9, donde el valor de la integral está representado por el área sombreada bajo la curva.

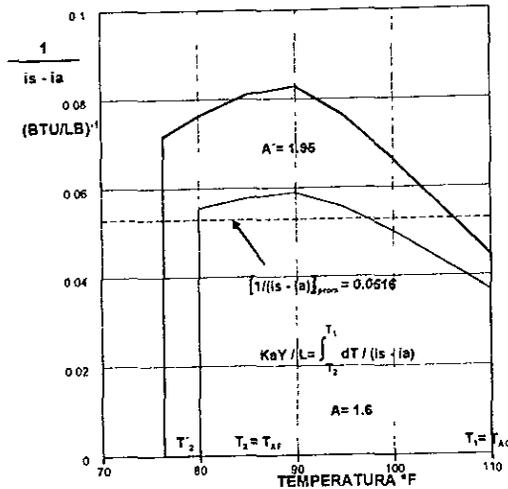


FIGURA 2.9: DETERMINACIÓN DEL KaY/L' , A PARTIR DEL ÁREA BAJO LA CURVA DE LA INTEGRAL.

El impacto del coeficiente de transferencia de masa (Ka) sobre el desarrollo de las torres de enfriamiento, se puede visualizar de la siguiente manera. Las tres cantidades fijas mostradas en la figura no. 2.7, son:

- 1) La relación del flujo de aire y el flujo de agua (L'/G''); la cual en la figura no. 2.8 representa una línea recta con una pendiente L'/G'' .
- 2) La temperatura del agua caliente (T_1), lo cual indica que la línea de operación atraviesa la línea vertical A-A' (ver figura no. 2.8).
- 3) La entalpía del aire de entrada a la torre (i_2), la cual representa la línea de operación cruzando la línea horizontal B-B' (ver figura no. 2.8).

De esta forma, la relación entre el coeficiente de transferencia de masa (K_a) y las condiciones de operación dentro de la torre, es que la "correcta" línea de operación es aquella que está colocada de forma tal que siempre que se mueva en posición paralela conserve la misma pendiente, y está ubicada de forma tal que la curva resultante de $(i_s - i_a)^{-1}$ tiene un área bajo la curva igual a $K_a Y/L$ (ver figura no. 2.9).

El área alterna sombreada y mostrada en la figura no. 2.9 ilustra como una diferente línea de operación produce una diferente área bajo la curva de $(i_s - i_a)^{-1}$. se puede apreciar como un incremento en la K_a (en este ejemplo $K_a Y/L$ se incrementa de 1.6 a 1.95) indica que la "correcta" línea de operación es la que encierra a la curva de equilibrio, resultando en un menor valor en la temperatura del agua de salida, T_2 (en este ejemplo se reduce de 79 a 76 °F con una temperatura de bulbo húmedo (T_{BH}) constante).

En torres de enfriamiento, es practica común llamar al valor de la integración de la ecuación no. 2.35 (el área bajo la curva de la figura no. 2.9) el número de unidades de transferencia (Ntu).

El número de unidades de transferencia nos indica el número de veces que el potencial de las entalpías promedio $(i_s - i_a)$ o fuerza directriz media se tiene entre los cambios de la entalpía del agua $C_L (T_2 - T_1)$; y el total de la integral es una medida de la dificultad de la operación, la cual se denomina como el número de unidades de transferencia.

De este modo, una unidad de transferencia, ó 1 Ntu, corresponde a la situación donde $C_L \Delta T / (i_L - i_L)_{promedio} Q = 1$. también en la figura no. 2.9, el área $A = 1.6$ y es el producto de la diferencia de temperaturas $(T_{AC} - T_{AF}) = (110 - 79 \text{ °F})$ y un valor promedio de $1/(i_s - i_a)$ como se indica por la línea punteada.

un ejemplo con el que el concepto del número de unidades de transferencia se puede comprender de mejor manera, es mediante la ilustración de un montón de grava que se deberá mover del punto α al punto β utilizando un camión de un tamaño específico. el número de viajes requerido, es el tamaño del montón dividido entre el tamaño del camión; en esta analogía, el tamaño del montón representa el rango al cual el agua es enfriada, el

tamaño del camión representa el promedio de la diferencia de entalpías $(i_s - i_a)_{prom.}$ y el número de viajes representa el número de unidades de transferencia (**Ntu**).

Consistentemente con la definición de $KaY/L'' = Ntu$, observación que uno puede hacer es que la altura de la unidad de transferencia (**Htu**) en una torre a contraflujo, está dada por Y/Ntu o $L''/Ka = Htu$ esta es la altura aproximada de relleno *requerida para realizar el cambio en la entalpía de la corriente de agua, que es igual a la fuerza motriz de las entalpías promedio entre la corriente de aire y la corriente de agua.*

$$Y \quad \frac{KaY}{L''} = Ntu \quad (\text{Ec. 2.36a})$$

$$\frac{Y}{Ntu} = Htu = \frac{L''}{Ka} \quad (\text{Ec. 2.36b})$$

en consecuencia, la altura total requerida de relleno para poder realizar el cambio total de entalpía es:

$$Y = Htu \quad Ntu \quad (\text{Ec. 2.36c})$$

2.10.2 MÉTODOS DE SOLUCIÓN NÚMÉRICA PARA UNA TORRE A CONTRAFLUJO.

a) MÉTODO DE INTEGRACIÓN NUMÉRICA.

El desarrollo del procedimiento generalizado envuelto en la integración numérica para una torre que opera a contraflujo, puede ser descrito de la siguiente manera. Primero, suponemos que la capacidad calorífica del agua es iguala a uno ($C_L=1$); expresando las ecuaciones no's. 2.35 y 2.36 como una ecuación de diferenciales finitas:

$$\frac{\Delta T}{i_s - i_a} \quad \frac{Ka \Delta Y}{L''} = \frac{Ka \Delta V}{L} \quad (\text{Ec. 2.37})$$

$$\Delta i_a = (L''/G'') \Delta T \quad (\text{Ec. 2.38})$$

en donde: ΔY = Incremento vertical de la altura en la torre, obtenido de la división de la altura total de la torre entre n incrementos.

ΔT = El cambio de la temperatura del agua al cabo del incremento.

Δi_a = El cambio de la entalpía del aire al cabo del incremento.

La ecuación no. 2.38, es la expresión para la línea de operación A-B en la figura no. 2.8. para la cual y dependiendo de la naturaleza del análisis a realizar, son utilizadas diferentes combinaciones de los valores iniciales de la entalpía del aire y la temperatura del agua y/o valores del coeficiente de transferencia de masa (K_a) para establecer las condiciones iniciales para el cálculo de la temperatura del agua y la entalpía del aire a través de la torre. Utilizando las ecuaciones no's. 2.37 y 2.38. por ejemplo, supongamos que queremos conocer que temperatura de agua fría puede ser obtenida, utilizando una torre de enfriamiento con empaque de características conocidas, bajo las condiciones de carga térmica fija, la entalpía del aire de entrada y L/G.

Se deberán de seguir los siguientes pasos:

- 1 - Suponer una temperatura del agua caliente. Calcular la temperatura del agua fría y la entalpía del aire de salida utilizando la carga térmica estipulada y el balance total de entalpías (ecuación no. 2.36). Esto establece la estimación inicial de las condiciones de cada extremo de la torre de enfriamiento.
- 2.- Calcular los N_{tu} disponibles, ejemplo, $K_a Y/L$ ". (Suponiendo que el flujo de agua está especificado, de forma tal que el rango de enfriamiento del agua está también establecido. Otra variación de este problema puede observarse al tener una línea de acercamiento similar).
- 3.- Conociendo el valor de la $K_a Y/L$ ", se establecen "n" incrementos de $K_a Y/L$ " (por ejemplo 10) y se calcula la temperatura del agua y la entalpía del aire a través de la torre, estableciendo que $\Delta T = (K_a Y/nL)$ ($i_s - i_a$), y descendiendo desde lo alto de la torre (por ejemplo desde T_{AC}) hasta realizar los "n" incrementos de la altura.

4.- Si la entalpía de entrada y la temperatura del agua fría no son iguales a los valores calculados, sobre la base de la temperatura del agua caliente supuesta, repetir el cálculo usando un nuevo valor supuesto de T_{AC} , hasta que las condiciones calculadas para el fondo de la torre sean las mismas que aquellas que se supusieron para la temperatura del agua caliente.

b) MÉTODO DE CHEBYSHEV, PARA LA RESOLUCIÓN NUMÉRICA DE UNA TORRE A CONTRAFLUJO.

El método de chebyshev para la evaluación numérica de la integral, es el método más comúnmente empleado; este método se utiliza para la solución de integrales del tipo $\int_a^b y dx$ y dx , utilizando valores de y a valores predeterminados de x dentro del intervalo de a hasta b , seleccionado de forma tal que la suma de estos valores de y multiplicando el intervalo $(b - a)$ por un número de veces constante dan el valor deseado de la integral. En la forma de estos cuatro puntos, los valores de y así seleccionados son tomados a los valores de x (por ejemplo 0.102673 ... , 0.406204 ... , 0.593796... y 0.897327... del intervalo $(b-a)$). Para la determinación del valor de KaV/L , redondeando estos valores hasta el decimal más próximo, la fórmula aproximada queda como:

$$\int_a^b y dx = \frac{(b-a)}{4}(y_1 + y_2 + y_3 + y_4) \quad \text{(Ec. 2.39)}$$

donde

$$y_1 \approx \text{El valor de } y \text{ para } x = a + 0.1(b-a) \quad \text{(Ec. 2.39a)}$$

$$y_2 \approx \text{El valor de } y \text{ para } x = a + 0.4(b-a) \quad \text{(Ec. 2.39b)}$$

$$y_3 \approx \text{El valor de } y \text{ para } x = b - 0.4(b-a) \quad \text{(Ec. 2.39c)}$$

$$y_4 \approx \text{El valor de } y \text{ para } x = b - 0.1(b-a) \quad \text{(Ec. 2.39d)}$$

Para la evaluación de KaV/L , nos quedaría de la siguiente forma:

$$\frac{KaY}{L} = \int_{T_2}^{T_1} \frac{dT}{h_w - h_a} \cong \frac{T_1 - T_2}{4} \left[\frac{1}{\Delta h_1} + \frac{1}{\Delta h_2} + \frac{1}{\Delta h_3} + \frac{1}{\Delta h_4} \right]$$

En donde

$\Delta h_1 =$ El valor de $(h_w - h_a)$ para $T_2 + 0.1(T_1 - T_2)$.

$\Delta h_2 =$ El valor de $(h_w - h_a)$ para $T_2 + 0.4(T_1 - T_2)$.

$\Delta h_3 =$ El valor de $(h_w - h_a)$ para $T_1 - 0.4(T_1 - T_2)$.

$\Delta h_4 =$ El valor de $(h_w - h_a)$ para $T_1 - 0.1(T_1 - T_2)$.

2.10.3 INTEGRACIÓN NUMÉRICA PARA UNA TORRE QUE OPERA A FLUJO CRUZADO.

La determinación del coeficiente de transferencia de masa para una torre de enfriamiento que opera a flujo cruzado no es significativamente más difícil que para una torre que opere a contraflujo, aunque el proceso en realidad no se presta para una descripción y/o representación gráfica, como en el caso la torre a contraflujo.

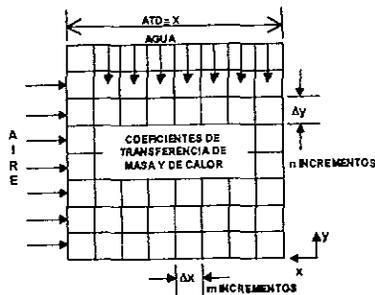


FIGURA 2.10: CONFIGURACIÓN DE UNA TORRE A FLUJO CRUZADO.

En la figura no. 2.10, se ilustra el arreglo gráfico de una torre que opera a flujo cruzado. las expresiones que relacionan los cambios entre la entalpía del aire y la temperatura del agua, y que son comparables a las ecuaciones no's. 2.36 y 2.38 son:

$$L''dTdx = G''di_a dy \quad (\text{Ec. 2.40})$$

$$L''\Delta X \Delta T = G''\Delta y \Delta i_a \quad \text{ó} \quad \Delta i_a = \frac{L''\Delta X \Delta T}{G''\Delta Y} \quad (\text{Ec. 2.41})$$

de forma tal que si las ecuaciones 2.35 y 2.37 son sustituidas por las dos ecuaciones, quedan de la siguiente manera:

$$\frac{KaY}{L''} = \int_{T_2}^{T_1} \frac{dT}{i_s - i_a} \quad \text{ó} \quad \frac{Ka\Delta Y}{L''} = \frac{\Delta T}{i_s - i_a} \quad (\text{Ec. 2.42a})$$

$$\frac{KaX}{G''} = \int_{i_{a2}}^{i_{a1}} \frac{di_a}{i_s - i_a} \quad (\text{Ec. 2.42b})$$

De esta forma la torre de enfriamiento queda dividida en incrementos tanto en la dirección de las X's como en la dirección de las Y's y dentro de cada incremento, los cambios relativos en la temperatura del agua y en la entalpía del aire son gobernados por ecuaciones diferenciales equivalentes a la ecuación no. 2.41 esta magnitud del cambio (o velocidad del cambio), es gobernada por las ecuaciones no. 2.42 el valor de la temperatura del agua caliente es conocido en todos los incrementos a través de lo alto de la torre, y el valor de la entalpía es conocido en todos los incrementos a través de las entradas de aire a la torre, tal y como se puede apreciar en la figura no. 2.10.

Para el análisis de una torre de enfriamiento a flujo cruzado, los incrementos son representados por KaX/G'' en la dirección horizontal y designados con el subíndice "m", y por KaY/L'' en la dirección vertical y designados con el subíndice "n". para facilitar su cálculo, normalmente es utilizado el mismo número de incrementos en cada dirección, de forma tal que $\Delta X/\Delta Y = X/Y$ de manera que por definición

$$\Delta x = Ka\Delta X/G'' \quad \text{y} \quad \Delta y = Ka\Delta Y/L'' \quad (\text{Ec. 2.43a})$$

$$\Delta x = \Delta y(L''X/G''Y) \quad (\text{Ec. 2.43b})$$

De las ecuaciones 2.41 y 2.42, tenemos que $\Delta X = X/(\text{número de incrementos seleccionados})$.

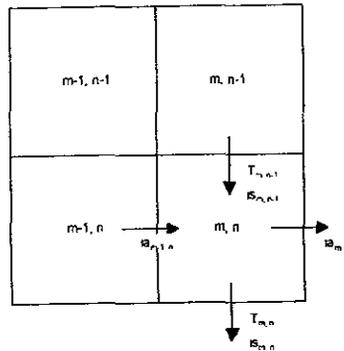
El cambio de temperatura a través de un incremento vertical es igual al cambio de entalpía del aire de entrada a través de los incrementos horizontales. combinando las ecuaciones 2.42 y 2.43a, el planteamiento matemático de esta caso (suponiendo que la

fuerza impulsora ($i_a - i_a$) es el promedio de las dos fuerzas impulsoras al principio y al final de los incrementos) es:

$$T_{m,n} - T_{m,n-1} = \frac{-\Delta y}{2} (i_{s_{m,n-1}} - ia_{m-1,n} + i_{s_{m,n}} - ia_{m,n}) \quad (\text{Ec. 2.44})$$

$$ia_{m,n} - ia_{m-1,n} = \frac{-\Delta y}{2} (i_{s_{m,n-1}} - ia_{m-1,n} + i_{s_{m,n}} - ia_{m,n}) \quad (\text{Ec. 2.45})$$

Estos cambios están representados esquemáticamente en la figura no. 2.11. donde se puede observar que la temperatura del agua y la entalpía del aire para un incremento están determinados por los valores de estas variables, justamente en los incrementos de las corrientes superiores (contracorriente) con respecto a la corriente del aire y la corriente de agua.



$$T_{m,n} - T_{m,n-1} = -\Delta y \left(\frac{i_{s_{m,n-1}} - ia_{m-1,n} + i_{s_{m,n}} - ia_{m,n}}{2} \right)$$

$$ia_{m,n} - ia_{m-1,n} = \Delta x \left(\frac{i_{s_{m,n-1}} - ia_{m-1,n} + i_{s_{m,n}} - ia_{m,n}}{2} \right)$$

FIGURA 2.11.- FUERZAS IMPULSORAS EN UNA TORRE QUE OPERA A FLUJO CRUZADO

El número de unidades de transferencia (Ntu) corresponde generalmente a una serie de condiciones establecidas, por ejemplo, el valor de la integral de la ecuación no. 2.35, es

llamado "el coeficiente requerido". Y este es una medida de la dificultad para alcanzar el enfriamiento requerido, porque, como se estableció anteriormente, este representa el cambio total en la entalpía del agua que está siendo enfriada (cambio de temperatura de esta), dividida por el promedio de la fuerza impulsora disponible para lograr el enfriamiento.

EN general, para el caso de una torre de enfriamiento que opere a flujo cruzado, el número de unidades de transferencia (Ntu) dependerá de la temperatura del agua caliente. Sin embargo el parámetro convencional es el acercamiento (approach). Puesto que el acercamiento $\equiv (T_{AC} - T_{BH}) - \Delta T_{\text{rango}}$, los dos son completamente equivalentes. el otro parámetro que afectará el numero de unidades de transferencia requeridos (Ntu's) es la relación del flujo de aire a flujo de agua (L/G) en la figura no. 2 11 se muestra un ejemplo del número de unidades de transferencia requerido como una función de estos dos parámetros (acercamiento y L/G).

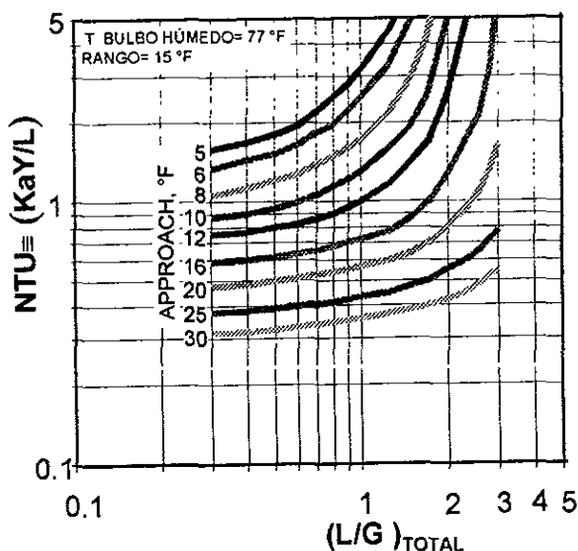


FIGURA 2.12: OPERACIÓN DE UNA TORRE A CONTRAFLUJO CON RELACIONES L/G VARIABLES.

Para cualquier valor de acercamiento, el mínimo número de Ntu's se tiene cuando $L/G=0$, que corresponde a un flujo de aire infinito. Puede suceder que no se tengan

incrementos en la entalpía, de este modo la fuerza impulsora será la máxima alcanzable. Cuando se disminuye el flujo de aire (se incrementa la L/G) decrece la fuerza impulsora, por lo que se requerirá una mayor cantidad de $Ntu's$; del mismo modo se requerirá un número infinito de unidades de transferencia cuando la línea de operación intercepte a la curva de operación, de forma tal que será imposible lograr el enfriamiento del agua buscado *cuando se presente este fenómeno*, debido a que la fuerza impulsora es cero (0) y en este punto de cero fuerza impulsora se puede presentar a la salida del aire o en algún punto intermedio de la torre.

De este modo tanto las torres de enfriamiento a contraflujo y a flujo cruzado tienen el mismo coeficiente mínimo a $L/G=0$, y en ambas el coeficiente se incrementa al infinito cuando se tiene un máximo L/G . Este máximo es el mismo si el potencial de una torre a contraflujo alcanza el valor de cero en el aire de salida, pero la torre a contraflujo tendrá un menor L/G máximo cuando el potencial alcance cero en un punto intermedio, como se muestra en la figura no. 2.13. una torre de enfriamiento puede ser diseñada para operar dentro de cualquier punto dentro de estos dos límites; pero una consideración práctica es limitar el diseño en límites más estrechos, los cuales son determinados por la velocidad del aire.

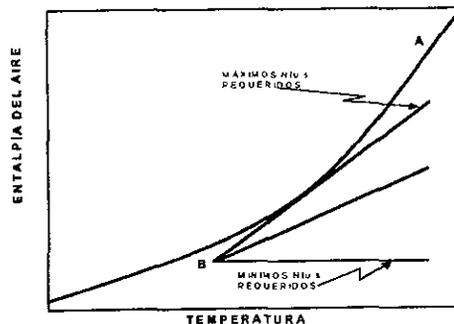


FIGURA 2.13: DIAGRAMA DE UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO A CONTRAFLUJO PARA CONDICIONES CONSTANTES, CON UNA RELACIÓN L/G VARIABLE.

Un flujo de aire bajo, requiere una torre de enfriamiento más grande, mientras que con un flujo de aire alto se requiere una torre de enfriamiento pequeña, pero que requiere una mayor potencia en los ventiladores. Los límites prácticos en la velocidad del aire fluctúan

entre 300 y 650 ft/min para una torre a contraflujo y de 350 a 700 ft/min para una torre a flujo cruzado. Estas velocidades mayores para una torre a flujo cruzado son debidas a la mayor apertura del empaque utilizado y porque el aire de salida no pasa a través de los sistemas de distribución de agua.

2.11 COEFICIENTE CARACTERÍSTICO DEL RELLENO, K_a .

Los Ntu 's requeridos, llamados el trabajo a realizar por la torre, dividido entre la fuerza impulsora promedio disponible para realizar el trabajo, los cuales son representados por el lado derecho de la ecuación no 2.35, designados como KaY/L'' .

Dentro de la industria de torres de enfriamiento, la diferenciación que se tiene entre la expresión para los Ntu 's para las torres a contraflujo y para los de las torres a flujo es que para las torres a flujo cruzado, la expresión es como la desarrollada KaY/L'' . Mientras que para las torres a contraflujo la expresión equivalente es KaV/L , la cual es igual a $KaYA_c/L''A_c$

Datos experimentales han demostrado que el valor de K_a (el coeficiente volumétrico de transferencia de masa, el cual es característico de cada empaque particular de cada torre) también varían con L'' y G'' ; pero más específicamente KaY/L'' varía con la relación L/G .

En realidad, para las torres a contraflujo, el KaY/L'' es (como previamente se estableció) equivalente al KaV/L ; así mismo el coeficiente teórico de transferencia de masa a través de la superficie envolvente con comportamiento laminar, es proporcional a la velocidad del aire, elevada a 0.5. además de que el coeficiente de transferencia de calor a través de la interfase recientemente formada también variará con una potencia de 0.5 del tiempo en que la interfase fue desarrollada. si esta tendencia fuera aplicada a torres de enfriamiento empacadas, una simple curva sería utilizada para correlacionar los Ntu 's, es decir

$$\frac{KaY}{L''} \sim (L/G)^{0.5} \quad (\text{Ec. 2.46})$$

pero realmente el exponente, n , normalmente aplica para un rango entre -0.40 y -0.6, pero según los resultados experimentales que se tienen reportados, estos varían dentro de un rango de -0.30 a -0.67. de esta forma, la correlación se mejora utilizando una familia de curvas que corresponden a la relación

$$\frac{KaY}{L''} \sim (L'')^n (G'')^m \quad (\text{Ec. 2.47})$$

donde n corresponde a los valores antes mencionados y m varía desde 0.28 a 0.61.

2.12 EFECTO DE LA TEMPERATURA DEL AGUA SOBRE EL Ka CARACTERÍSTICO DEL RELLENO.

En general los coeficientes presentan desviaciones estrechas asociadas con la temperatura del agua caliente y pueden ser modificados mediante un factor empírico de corrección para el agua caliente (Baker y Mart 1952).

La disminución en los valores del KaV/L pueden deberse a un sin número de factores, una posibilidad es que la reducción puede deberse a la simplificación asumida de que no hay resistencia a la transferencia de calor en el lado del líquido de la interfase. Esta suposición puede ser salvada al modificar el proceso de integración, ya que la teoría básica considera la transferencia desde la interfase hacia la corriente de aire; sin embargo las condiciones de la interfase son determinantes, y sin embargo la resistencia de la película en la interfase no se ha (ver ecuación no 2.34).

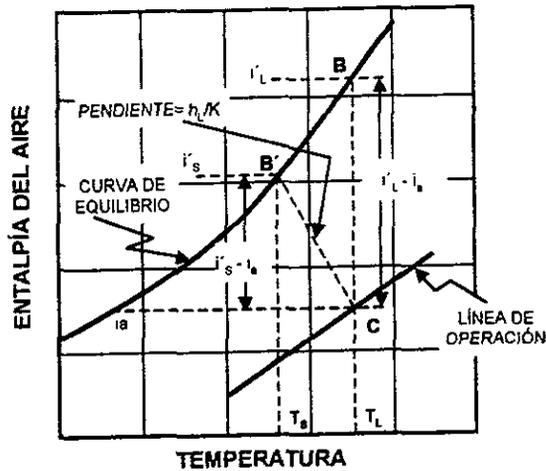


FIGURA 2.14: DIFERENCIA DE POTENCIALES "REAL vs APARENTE"

El efecto de la resistencia de la película en el lado del agua de la interfase aire-agua se muestra en la figura no. 2.14. En un punto de la torre representado por el punto C, el agua a la temperatura T_L la cual se supone que tiene la misma temperatura que la temperatura de la superficie. Se supone que esta agua está en contacto con el aire, en la interfase aire-agua, el cual está saturado a esa temperatura; de este modo, en la interfase del lado del aire, el aire tienen una entalpía i'_L representada por el punto B sobre la curva de saturación; sin embargo en la realidad la interfase aire-agua se encuentra a una menor temperatura, T_s , y el aire saturado se encuentra a esta mínima temperatura y a la entalpía i'_s representado por el punto B'; mientras que el aire circundante a la entalpía i_a correspondiente al punto C; habitualmente es considerada la diferencia aparente de potenciales ($i'_L - i_a$), pero la diferencia de potenciales real (Mickley 1949) ES ($i'_s - i_a$). Por lo tanto las ecuaciones 2.28 y 2.29 quedarían de la siguiente manera:

$$\frac{(i'_s - i_a)}{C_w (T_s - T_a)} = \frac{h_w}{K} \quad (\text{Ec. 2.48})$$

Con lo que la pendiente de C-B' es la relación de los dos coeficientes; sin embargo ningún medio para evaluar los coeficientes ha sido demostrado. No obstante que para las

torres a flujo cruzado se ha reportado una relación de 11.1 (es decir una pendiente de - 11 1, Baker y Shryrock).

2.13 EVOLUCIÓN Y TIPOS DE TORRES DE ENFRIAMIENTO.

En realidad el tipo de torres de enfriamiento más utilizadas en la industria mexicana caen en el tipo de las torres de flujo cruzado y de contraflujo; no obstante que las torres de enfriamiento son diseñadas y fabricadas en varios tipos, en diferentes tamaños, modelos (disponibles para cada tipo); no todas son apropiadas para aplicarlas en cada configuración de carga térmica; debido a que cada tipo tiene sus ventajas y limitaciones, por lo que es muy importante *seleccionar el tipo de torre más adecuado para el servicio para el que se desea utilizarla.*

Así mismo y a manera de introducción se mencionará la evolución que han tenido las torres de enfriamiento a través de la historia para poder formarse un mejor panorama de estas.

El primer tipo de torre de enfriamiento de que se tiene conocimiento que fue utilizada, fue la del tipo de **estanque de aspersión**. Este tipo de torres de enfriamiento eran simples de construir y su mantenimiento era de bajo costo. Sin embargo, estas siempre *requirieron grandes áreas* y siempre fueron muy ineficientes y provocaban serios problemas de corrosión a las instalaciones aledañas por la gran cantidad de arrastres de agua que se tienen en este tipo de enfriadores. No obstante, este tipo de sistemas de enfriamiento aun se siguen utilizando, principalmente por plantas que cuentan con la superficie de terreno suficiente para poder acomodarlas.

La siguiente etapa fueron las torres atmosféricas. Estas en un principio fueron solamente paredes con persianas alrededor del estanque de aspersión, para reducir la cantidad de arrastres. Sin embargo esto redujo el flujo de aire lo que ocasionó que requirieran un mayor tiempo de contacto entre el aire y el agua. Por lo tanto se les tuvieron que incluir *tablillas de madera*, con lo que la altura de la estructura se hizo crecer, resultando en las torres atmosféricas similares a las actuales. Estas torres fueron más eficientes que los estanques de aspersión; sin embargo estas dependieron de que existieran corrientes de aire, para obtener un máximo enfriamiento; además estas torres no tenían equipo mecánico o partes móviles. Pero tienen el inconveniente de requerir grandes extensiones de terreno, por ejemplo algunas de estas torres atmosféricas llegan a tener longitudes de hasta 460 mts.

Posteriormente, le fueron adicionadas las chimeneas de tiro natural, con el objeto de incrementarles el flujo de aire; con lo que se logro reducir la superficie requerida hasta entonces por las torres de tiro natural abiertas. En 1911 en Estados Unidos de Norte América el 70% de las torres que operaban en las plantas de generación de energía eléctrica, solo operaban en la noche. Sin embargo esta ineficiencia y lo impredecible de las torres de tiro natural, fueron factores de poca importancia para que estas continuaran operando. Y no fue hasta que en las plantas productoras de hielo, se demandó que la eficiencia diaria fuera más predecible, debido a que era necesario que estas plantas operaran durante el día, además de que la disponibilidad de espacio de estas planta fue menor.

Fueron las torres de tiro forzado con los ventiladores ubicados en el fondo de la torre, las que se desarrollaron para poder absorber los incrementos en las cargas. Estos ventiladores impulsaban grandes cantidades de aire a través de la torre, reduciendo la relación L/G, e incrementándose su eficiencia. Sus ventajas fueron que requerían menor área que las torres atmosféricas y el hecho de que el equipo mecánico se localizará a nivel de piso, proporcionaba estabilidad lo que ocasionaba que se requiriera una menor estructura en el cuerpo de la torre.

Mientras que dentro de sus desventajas se contemplaba: el costo y el mantenimiento de las partes mecánicas (partes móviles); baja velocidad del aire de salida, lo que ocasionaba la recirculación del aire saturado; además y debido a lo extenso de los eliminadores de niebla y a que estos estaban expuestos a la luz solar se tenía una elevada proliferación de algas; y la dificultad que se tenía para mantener la cubierta a prueba de fugas debido a la presión positiva manejada dentro de la torre. No obstante de estos inconvenientes muchas de estas torres aun se encuentran en operación actualmente.

Torres de tiro inducido: este tipo de torres fueron desarrolladas a finales de los años 30's y principios de los 40's. estas presentaban algunas desventajas respecto a las de tiro forzado, tales como: La necesidad de una estructura más robusta para soportar el peso de los equipos mecánicos; requirieron de flechas y reductores en ángulo recto para poder mantener el motor eléctrico fuera de la corriente de aire, con la consecuente

dificultad para el alineamiento de la flecha. Sin embargo estas desventajas fueron más que compensadas por las ventajas, dentro de las cuales podemos mencionar: mayores velocidades del aire de salida, con lo que se redujo la recirculación del aire; se tenían presiones internas negativas, con lo que se eliminaron los problemas del sellado de la envolvente de la torre y se resolvió el problema de las fugas de aire; además de que tenía una mejor distribución del aire. Actualmente este es el tipo de torre preferida y más difundida dentro de la industria.

Después de la segunda guerra mundial, las necesidades de las torres de enfriamiento se vieron incrementadas debido al advenimiento y popularización del aire acondicionado, por lo que el requerimiento y utilización de las torres de enfriamiento se fue expandiendo.

No fue sino hasta el periodo de los años 40's a los 50's, en el que la industria de las torres de enfriamiento sufrió un gran crecimiento y fue el advenimiento de las torres de tiro inducido lo que propició la casi total eliminación de las torres de tiro natural, atmosféricas y las torres de tiro forzado; debido a que las nuevas torres de tiro inducido eran por mucho, más predecibles y confiables.

Las torres de tiro inducido se construyen en dos diferentes configuraciones, a contraflujo y a flujo cruzado.

TORRES A CONTRAFLUJO: en este tipo de torres, el aire entra a esta por la parte baja y la atraviesa verticalmente hacia arriba, pasando a través del relleno y de los eliminadores de niebla, para salir por el ventilador. Mientras que el agua fluye verticalmente desde las boquillas aspersoras, ubicadas en la parte superior de la torre, descendiendo a través del relleno, hasta el bacín.

TORRES A FLUJO CRUZADO: En este tipo de torres, el aire pasa a través de las persianas laterales de la torre, las cuales se extienden desde la base del bacín hasta las piletas de distribución de agua caliente en los extremos de la torre; mientras que el aire pasa en forma horizontalmente a través del relleno y eliminadores de niebla, para entonces fluir verticalmente hacia y a través de las chimeneas. Mientras que el agua fluye desde el sistema de distribución abierto (bacines de agua caliente) ubicados en los

extremos del piso superior de la torre, descendiendo en forma vertical a través del relleno hasta el bacín colector del agua fría.

2.14 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LAS TORRES DE ENFRIAMIENTO A CONTRAFLUJO Y A FLUJO CRUZADO.

VENTAJAS DE LAS TORRES A CONTRAFLUJO:

- 1) Se tiene un mayor eficiente uso del aire, debido a que todo el aire pasa a través del agua más caliente, y se tiene un menor tamaño en las gotas de agua debido a la utilización de aspersores a presión.
- 2) Se tiene una mínima exposición a la luz solar del relleno y del sistema de distribución de agua caliente, lo que reduce la formación de algas.
- 3) La altura de la torre se puede incrementar fácilmente para manejar rangos mayores o acercamientos más cerrados.
- 4) Son más apropiadas para implementarles relleno tipo película con lo que se abate la altura del relleno obteniéndose menores requerimientos de potencia en los ventiladores.

DESVENTAJAS DE LAS TORRES A CONTRAFLUJO:

- 1) Requieren una mayor presión estática del aire.
- 2) Sus boquillas de distribución dificultan su inspección y limpieza.
- 3) Requieren de cabezales de distribución individuales para cada celda.
- 4) Al incrementarles el flujo de agua, también se incrementa la cabeza de bombeo.
- 5) El diseño de las boquillas aspersoras es de acuerdo al flujo de diseño, por lo que son sensibles a los cambios de flujo, y en consecuencia se tienen cambios en la presión de las boquillas cuando se les varía el flujo.

VENTAJAS DE LAS TORRES A FLUJO CRUZADO:

- 1) Requieren una menor presión estática del aire.
- 2) Los estanques de distribución de agua caliente abiertos, permiten una fácil inspección y limpieza de las boquillas aspersoras.
- 3) Soporta grandes variaciones en el flujo de agua, sin sufrir efectos adversos en el diseño de las boquillas de distribución del agua.

- 4) Los incrementos en el flujo de agua producen mínimos incrementos en la cabeza de bombeo del sistema de la torre.

DESVENTAJAS DE LAS TORRES A FLUJO CRUZADO:

- 1) El hecho de que se tenga un bacín redistribución de agua caliente abierto, incrementa la proliferación de algas, y por ende el consumo de cloro u otros alguicidas; pero este bacín puede estar u operar cubierto, con lo que se reduce sensiblemente el problema.
- 2) Se tiene un uso deficiente del aire, debido a que parte de este pasa a través del agua fría, además de que las boquillas aspersoras producen una menor dispersión del agua, teniéndose gotas de mayor tamaño lo que repercute en una menor área de transferencia.
- 3) Son poco apropiadas para operar con relleno tipo película.
- 4) Es más difícil de controlar el congelamiento.
- 5) La altura de la torre se incrementa para poder manejar mayores rangos o acercamientos más cerradas. Es más difícil debido a que la cámara plena de la torre es demasiado ancha.

Por otro lado a principios de los años 60's se introdujeron las nuevas torres europeas de concreto y de tiro natural. Esta mejora en la vieja versión de las torres de madera de tiro natural, incrementó la altura y diámetro de las chimeneas, para poder manejar grandes cargas térmicas de las centrales eléctricas. Este tipo de torres fueron construidas en ambas configuraciones, contraflujo y flujo cruzado. Siendo la mayor ventaja de este tipo de torres, la eliminación del equipo mecánico, así como su mantenimiento y su menor consumo de energía. Su desventaja es el alto costo inicial, comparado con las torres convencionales de tiro inducido; requieren mayores cabezas de bombeo; dificultad para mantener la estructura de concreto intacta, en el ambiente de una torre de enfriamiento; y en el caso de las torres a flujo cruzado, dificultad en el control de los daños por congelamiento.

A principios de los años 70's, con el endurecimiento de las leyes ambientales, en lo referente a la contaminación térmica o calentamiento de ríos y arroyos, creó la necesidad de que las torres de enfriamiento fueran más eficientes que las previamente utilizadas.

Así mismo el embargo petrolero de 1974, el embargo petrolero acentuó la necesidad de ahorrar energía. La solución al problema radicó en el desarrollo de una torre térmicamente confiable, pero que redujera sus requerimientos energéticos tanto de los motores de las bombas como de los motores de los ventiladores. Sin embargo, y aunque el relleno tipo película estuvo disponible y se utilizaba en algunas torres de aire acondicionado desde finales de los años 50's; su uso en torres del tipo industrial fue extremadamente limitado. Pero la evaluación de los consumos de potencia de las bombas y de los ventiladores, fue de vital importancia para que este tipo de relleno fuera ganando mercado. Ya que el relleno tipo película reduce los requerimientos de cabeza de bombeo en alrededor el 50% o más y el requerimiento de potencia en los ventiladores también es reducido; dentro de las ventajas de las torres con relleno de película se puede mencionar. Que se reduce la cabeza de bombeo, y potencia de los ventiladores; y son más eficientes que las torres con relleno del tipo salpiquéo. Dentro de las desventajas podemos listar: este tipo de relleno es fácilmente atascable y susceptible de ensuciarse; y no acepta que se tenga una mala distribución del líquido. Sin embargo este tipo de relleno continuamente ha ido ganado terreno en el mercado actual.

2.15 EVOLUCIÓN DE LOS MATERIALES UTILIZADOS EN LA CONSTRUCCIÓN DE LAS TORRES DE ENFRIAMIENTO.

En sus inicios se utilizaba madera de ciprés pero la baja producción en las cantidades y calidad requerida, creó la necesidad de buscar otro tipo de madera que sustituyera a esta variedad, por lo que se empezó a utilizar la madera de pino (*redwood*) la cual tiene la resistencia necesaria y mayor que cualquier otro tipo de madera, por lo que actualmente es el principal tipo de madera utilizado. Pero durante los años de los 50's se intento utilizar el pino amarillo en unas cuantas torres, debido principalmente a su bajo costo, sin embargo esta madera resulto con una mayor susceptibilidad a pudrirse, presentaba mayor inestabilidad en la estructura puesto que una vez erigida la estructura de la torre de enfriamiento se combaba y torcian con mayor facilidad; esto ocasionó que se eliminara su uso en torres de enfriamiento.

Fue a mediados de los años 60's que debido al continuo incremento en el precio y la disminución en la disponibilidad de este tipo de madera (*Redwood*), aunado a los

drásticos incrementos en los costos de impermeabilización y de mantenimiento, que causaron que se empezará a utilizar la madera de pino Douglas, siendo la principal ventaja de esta madera su bajo costo, y que también es mecánicamente fuerte. Sin embargo esta madera es menos resistente a la pudrición, lo que la hace más dependiente de la adición de preservadores químicos; así como la mayor apertura en su estructura la hace más susceptible a la deslignificación.

2.15.1 PAREDES EXTERIORES.

Las paredes de exteriores originalmente fueron paredes dobles de madera de pino (Redwood); pero estas presentaban un calentamiento, y humedecimiento de las áreas no inundadas entre las dos paredes, lo que propiciaba la proliferación de hongos.

Posteriormente se intentó utilizar el cloruro de polivinilo (PVC) en forma de placas corrugadas en una sola pared. Pero este material no funcionó en las paredes exteriores, debido a la alta expansión térmica de este material, lo que orillo a diseñar las paredes con ranuras en los clavos para absorber estas expansiones, lo que ocasionaba que se tuvieran fugas de aire y de agua por estas ranuras.

El siguiente material que se utilizó fueron las paredes de asbesto-cemento, en una sola pared, el cual se utilizó a lo largo de muchos años. Su desventaja era el alto peso de las placas y su susceptibilidad al ataque químico. Pero el descubrimiento de las propiedades cancerígenas de este prohibió su uso.

El siguiente material y más comúnmente utilizado actualmente son las placas corrugadas de poliéster reforzado con fibra de vidrio (FRP), que se emplea en paredes sencillas (una sola pared). Estas placas deben ser opacas para evitar la proliferación de algas dentro de la torre, y deberán tener aditivos protectores de la luz ultravioleta; y contar con una superficie protectora de vinilo para evitar la pérdida de plasticidad de la superficie expuesta a la luz, así como también deberá evitar la difusión de la flama en un intervalo de 25 seg. o menor.

2.15.2 CHIMENEA DEL VENTILADOR.

En un principio las chimeneas se construyeron de acero o de aluminio rígido; posteriormente se construyeron de madera de pino (Redwood) de 5 a 6 pies de altura con un redondel inferior de aluminio o acero. Estas chimeneas de madera posteriormente se extendieron a 14 y 18 pies de altura, con el objeto de incrementar la eficiencia de recuperación de la velocidad y por ende la eficiencia del ventilador, y de esta forma reducir la recirculación del aire saturado. Actualmente se ha extendido el uso chimeneas fabricadas a base de láminas de poliéster reforzado con fibra de vidrio, las cuales son resistentes a la pudrición y al ataque químico. Estas chimeneas poseen una alta recuperación de la presión de velocidad, además de que poseen el espesor suficiente para resistir la excesiva vibración de las pulsaciones del ventilador.

2.15.3 ELIMINADORES DE ARRASTRES.

Los eliminadores de arrastres, originalmente en la mayoría de las torres, estaban formados por tablillas de madera, con soportes de madera, hierro colado, triplay y poliéster reforzado con fibra de vidrio. Actualmente los eliminadores de niebla, se fabrican principalmente de PVC de tipo celular, el cual es resistente a la pudrición y el ataque químico, además de que con este tipo de eliminadores se ha incrementado la eficiencia de eliminación de arrastres, lográndose alcanzar emisiones hasta del 0.003% del flujo circulante y menores.

2.15.4 RELLENO O EMPAQUE.

El relleno de las torres de enfriamiento ha sufrido mas cambios y modificaciones en sus materiales y diseño que cualquier otro componente de las torres; siempre en una búsqueda *continua* de incrementar el factor KaV/L o la capacidad de enfriamiento.

Originalmente el relleno se construía a base de tablillas de 3 a 4 pulgadas de ancho, las cuales posteriormente se redujeron a 1 ½ pulgadas de ancho. La mayoría de la los rellenos tenían una longitud de 6 pies, debido a que la madera de 8 pies de longitud no

era utilizada en la industria de construcción de casas, esto ocasionaba que se tuviera un menor precio de la madera de 6 pies de longitud. Posteriormente el incremento al precio de la madera provocó que la longitud del relleno se redujera a 4 pies para la mayoría de las torres a contraflujo y flujo cruzado, otra vez teniendo como ventaja el menor precio de la madera de corta longitud, empleándose ampliamente tablillas de una pulgada de espesor.

El poliéster moldeado y polietileno reticulado se utilizaron posteriormente. Así como también se utilizaron tablillas de poliéster reforzado con fibra de vidrio, y tablillas de polietileno extruído, pero estas eran dañadas por la luz ultravioleta.

Actualmente el relleno tipo salpiquéo se fabrica en varios diseños mediante PVC extruído, estas formas son diseñadas para obtener la máxima rigidez y la máxima área de contacto, con la mínima resistencia de presión estática, y para utilizar la menor cantidad de masa (peso) de material del empaque por pie cuadrado de superficie húmeda.

El cambio más significativo en el relleno, fue el relleno tipo película, el cual posee una capacidad grande de fragmentación de la gota de agua, lo que se traduce en una amplia área de contacto aire agua (comparado con el relleno tipo salpiquéo), con lo cual es más eficiente, lo que se traduce en una menor altura del relleno y bajos requerimientos de potencia en los motores de los ventiladores. Este relleno se fabrica a base de hojas de PVC preformado. Este tipo de relleno tiene el inconveniente de que se debe utilizar en sistemas y agua donde no exista el riesgo de atascamiento del relleno.

2.16 FACTORES EXTERNOS QUE AFECTAN LA OPERACIÓN Y DESEMPEÑO DE LAS TORRES DE ENFRIAMIENTO.

La atmósfera de la cual una torre de enfriamiento toma el aire, le incorpora una infinidad de variables psicrométricas, y la torre reacciona física y térmicamente a cada una de estas propiedades. La torre succiona el aire incrementándole la velocidad; pasando este a través de la estructura y del relleno de la torre; y el calor pasa al aire con lo que este se expande, se satura con el agua que se evapora y es lavado respondiendo a todos y cada uno de los efectos térmicos y aerodinámicos que tal tratamiento puede producir.

Finalmente, la torre retorna a la atmósfera (de su entorno) la corriente de aire utilizado, para que vientos atmosféricos lo dispersen y alejen de la torre y no vuelva a reintroducirse a la torre.

Obviamente, los factores que afectan el desarrollo de las torres de enfriamiento son numerosos. dentro de estos factores podemos mencionar los siguientes:

2.16.1 TEMPERATURA DE BULBO HÚMEDO.

La selección de la temperatura de bulbo húmedo de diseño deberá realizarse en base a las condiciones existentes en el sitio en el que se va a instalar la torre de enfriamiento, y deberá ser con la que resulte la optima temperatura del agua fría, o la más próxima a esta condición. La experiencia ha demostrado que la mayoría de las instalaciones industriales basadas sobre temperaturas de bulbo húmedo las cuales son excedidas en no más del 5% del total de horas durante un verano normal, han dado resultados satisfactorios. Las horas durante la temperatura de bulbo húmedo pico que se exceden arriba del 5% del nivel son pocas horas consecutivas, y generalmente ocurren en periodos de relativa corta duración.

Es recomendable que antes de decidirse por la temperatura de bulbo húmedo apropiada para el diseño de la torre realizar lecturas simultaneas de la temperatura de bulbo húmedo del sitio propuesto para la localización de la torre de enfriamiento, así como también en un lugar abierto, que no este afectado por la ubicación de a planta. estas lecturas deberán de ser comparadas al mismo tiempo con los registros de la fuente de datos más cercana y se deberá ajustar la temperatura de bulbo húmedo aparente de acuerdo a estos resultados.

Finalmente, y lo más importante, una vez que se ha decidido cual es la correcta temperatura de bulbo húmedo de diseño, se deberá aclarar si se trata de la temperatura de bulbo húmedo ambiental o de la temperatura de bulbo húmedo de entrada a la torre. Puesto que como se mencionó anteriormente, la base para un diseño térmico de cualquier sistema evaporativo del tipo de las torres de enfriamiento es la temperatura de bulbo húmedo del aire que esta entrando a la torre. Si la temperatura de bulbo húmedo

se especifica como la ambiental, entonces se deberá ajustar esta temperatura de bulbo húmedo para compensar cualquier posible recirculación del aire saturado.

Es conveniente resaltar que la determinación exacta de la temperatura de bulbo húmedo de diseño es vital, para que la torre de enfriamiento se comporte de acuerdo a lo esperado; ya que si la temperatura de bulbo húmedo de diseño es superior a la esperada, resultará que el agua se enfriará a una temperatura mayor a la esperada; y por otro lado si la temperatura especificada es menor que la temperatura esperada, entonces se tendrá una torre mas grande de lo requerido.

2.16.2 TEMPERATURA DE BULBO SECO.

Si bien ha sido una buena practica el establecer la temperatura de bulbo seco de diseño, esta es requerida únicamente cuando el tipo de torre a diseñar es afectada por este parámetro. Dentro de este tipo de torres se puede mencionar a las torres hiperbólicas de tiro natural, las torres de tiro natural auxiliadas con ventiladores, las torres del tipo secas, para el abatimiento de la pluma de la torre y las torres del tipo de conservación de agua. Así mismo este dato es requerido cuando se necesita conocer la velocidad absoluta de evaporación, a las condiciones de diseño de cualquier tipo de torre de enfriamiento.

2.16.3 CARGA TÉRMICA.

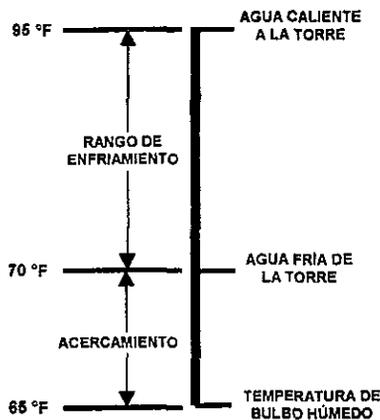
Del mismo modo con la adecuada selección del tamaño de la torre de enfriamiento, se establece la temperatura de equilibrio a la cual la torre desechará una carga térmica dada; la carga térmica real es determinada por el propio proceso al que la torre va a dar servicio; de lo contrario todas las torres de enfriamiento serían iguales. El tamaño y el costo de una torre de enfriamiento es proporcional a la carga térmica, por lo tanto es muy importante que la carga térmica sea determinada con una exactitud razonable en todos los casos; puesto que si la carga térmica determinada es baja, la torre de enfriamiento que se adquiriera, muy probablemente sea demasiado chica. Y si el cálculo de la carga térmica es alto, se adquirirá un equipo sobredimensionado, con un costo inicial y de operación más elevado.

Sin embargo, las grandes variaciones en la carga térmica que existen en el área de procesos industriales, hacen un tanto impredecible la determinación exacta de la carga térmica

2.16.4 FLUJO, RANGO Y ACERCAMIENTO (APPROACH).

La carga térmica impuesta a una torre de enfriamiento (btu/min.) es determinada por el producto del flujo de agua por minuto que esta circulando, multiplicada por la cantidad de grados en que es elevada la temperatura del agua por el proceso.

FIGURA 2.14: ESQUEMA ILUSTRATIVO PARA LA DEFINICIÓN DE "RANGO DE ENFRIAMIENTO" Y "ACERCAMIENTO".



En la figura 2.14, se muestra gráficamente la relación del rango y acercamiento y de cómo la carga térmica es aplicada a la torre de enfriamiento. Por lo que la combinación del rango, con el flujo de agua (constante) nos proporciona la carga térmica y el acercamiento (la diferencia entre la temperatura del agua fría y la temperatura de bulbo húmedo del aire que entra a la torre de enfriamiento).

El acercamiento de una torre está relacionado con el tamaño de la misma, por ejemplo para dos torres con la misma eficiencia, operando con su adecuada configuración de su relleno y su flujo de aire, la torre más grande proporcionará el agua con más baja temperatura, de acuerdo a como se indica en la figura no. 2.15.

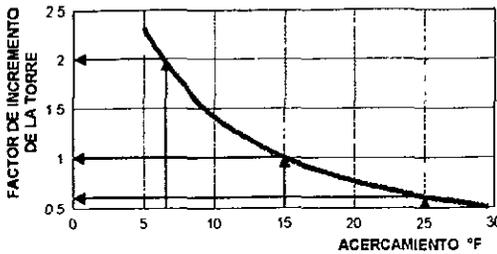


FIGURA 2.15: EFECTO DEL ACERCAMIENTO SOBRE EL TAMAÑO DE LA TORRE, MANTENIENDO CONSTANTES LA CARGA TÉRMICA, EL FLUJO DE AGUA Y LA TEMPERATURA DE BULBO HÚMEDO.

De la figura 15, es importante destacar el hecho de que para una torre con capacidad para enfriar hasta 15 °F de acercamiento, esta deberá ser dos veces más grande para poder enfriar hasta 7 °F de acercamiento (el agua estará 8 °F más fría); mientras que por otro lado, esta torre podría producir 25 °F de acercamiento (el agua quedará 10 °F más caliente) con únicamente el 60% de su tamaño.

Es conveniente notar que la curva de descenso del acercamiento en su inicio tiene una tendencia asintótica cuando tiende a cero de acercamiento. por esta razón, no es usual que en la industria de torres de enfriamiento se garantice un acercamiento menor a 5 °F.

Así mismo como se ha podido notar, la eliminación de la carga térmica puede ser acompañada con una infinidad de combinaciones de flujos de agua y de los rangos. sin embargo, comúnmente solo se utiliza una estrecha banda de posibles combinaciones, debidas a las limitaciones hidráulicas y/o los niveles de eficiencia térmica de los procesos a los que se les da servicio.

2.16.5 INTERFERENCIA.

Otro de los factores que afectan en gran medida el desempeño de una torre de enfriamiento es la interferencia, la cual en general puede deberse a las fuentes locales de calor que se ubiquen corriente arriba de la torre en la dirección de los vientos, estas fuentes de calor y/o humedad pueden elevar la temperatura de bulbo húmedo del aire que es alimentado a la torre, con lo que es afectado su desempeño. Una de tales fuentes de calor puede ser otra torre de enfriamiento que haya sido instalada previamente en el sitio, o en los alrededores. En la figura 2.16, se ilustra este fenómeno, en el cual una porción del aire saturado proveniente de una torre ubicada corriente arriba contamina el

ambiente de la torre que se ubica corriente abajo. De forma tal que la adecuada localización de la torre de enfriamiento y su orientación pueden minimizar los efectos de la interferencia, muchas instalaciones existentes reflejan la falta de un mayor alcance en su planificación, por lo que es conveniente que dentro del diseño de una nueva torre de enfriamiento se cuide este aspecto para evitar que la torre tenga un menor desempeño.

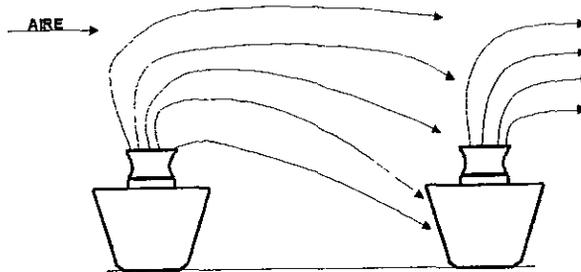


FIGURA 2.16: INTERFERENCIA

2.16.6 RECIRCULACIÓN.

Otro de los factores de primordial importancia y que se deberán cuidar para el óptimo desempeño de una torre de enfriamiento, es la recirculación del aire saturado que sale de las chimeneas de la propia torre, el cual ocasiona que se incremente la temperatura de bulbo húmedo del aire alimentado a la torre de enfriamiento; ya que entre la temperatura de bulbo húmedo del aire que entra a una torre de enfriamiento y la temperatura de bulbo húmedo del aire ambiental se tienen diferencias, puesto que la temperatura de bulbo húmedo del aire que entra a la torre es afectado por una porción del aire saturado que sale de esta, el cual es regresado y vuelto a introducir mezclado con el aire de entrada a la torre de enfriamiento.

La recirculación en las torres de enfriamiento ha sido definida como "la adulteración de la atmósfera de entrada a la torre por una porción de la atmósfera que abandona la misma torre" esta adulteración por el aire saturado incrementa la temperatura de bulbo húmedo del aire que entra a la torre, sobre la temperatura de bulbo húmedo reinante en el aire atmosférico, reduciendo el desempeño general de la torre.

La experiencia ha demostrado que la recirculación es predominantemente una función de la longitud de la torre; aunque se ha intentado incluir otras variables tales como la altura de la estructura, la altura de la chimenea, el ancho de la torre, la velocidad del aire de entrada a la torre; pero estas no han revelado ninguna tendencia ni influencia en la recirculación de las torres. Y en general las correlaciones publicadas hasta la actualidad, solo relacionan la recirculación como una función de la longitud de la torre. Del mismo modo también se ha observado que la recirculación está directamente relacionada a la fuerza y dirección de los vientos (figura no 2.17), ya que la recirculación tiende a incrementarse cuando la velocidad del viento se incrementa. Esto es debido a que a mayores velocidades del aire atmosférico, harán que la pluma tienda a la posición horizontal, con lo que una porción de esta tenderá a quedar atrapada en la zona de baja presión para volver a entrar a la torre de enfriamiento. De tal forma que a baja relación de velocidades (velocidad de descarga de la chimenea entre la velocidad del viento) o alta velocidad del aire, se tiene una mayor recirculación; del mismo modo la relación de velocidades también es función de la velocidad de descarga de la pluma, por lo que no toda la recirculación debe de atribuírsele a la velocidad del viento. Puesto que a cualquier condición del viento, la relación de velocidades disminuirá si la velocidad de la pluma es disminuida, resultando en un incremento en la recirculación hacia la torre de enfriamiento. Estas bajas velocidades en el aire de salida de la torre, provocan que las torres de tiro forzado sean más susceptibles de sufrir recirculaciones; debido a que la velocidad normal de descarga del aire de una torre de tiro inducido es de alrededor de 20 mph, mientras que en una torre de tiro forzado la velocidad de descarga del aire es de alrededor de 5 a 6 mph, por lo que esta diferencia en la velocidad de la pluma (aproximadamente 4:1) resulta en una más grande recirculación en las torres de tiro forzado.

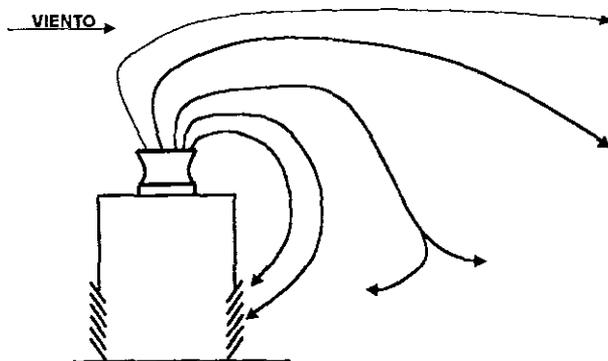


FIGURA 2.17:
RECIRCULACIÓN

Es conveniente aclarar que en operación normal la máxima recirculación, como la máxima temperatura de bulbo húmedo solo ocurren en una porción de tiempo, por lo que no se justifica económicamente diseñar una torre para tales condiciones máximas. Por lo tanto es más apropiado orientar la torre de acuerdo a los vientos reinantes, lo que generalmente contribuye a reducir la incidencia de la máxima recirculación, pero si tomar en consideración un sobrediseño para una recirculación recomendada corrigiendo la temperatura de bulbo húmedo de diseño, adicionando a la temperatura de bulbo húmedo ambiente el incremento de temperatura recomendable, en función de las condiciones desarrolladas por la torre.

El hecho de que una torre de enfriamiento se diseñe con la temperatura de bulbo húmedo corregida por la recirculación, le proporciona capacidad para poder absorberla.

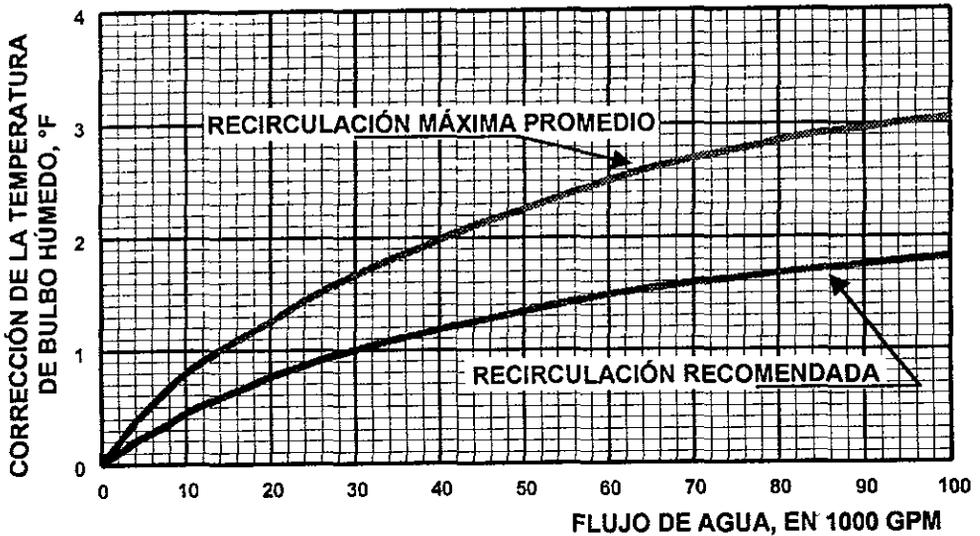


FIGURA 2.18: RECIRCULACIÓN RECOMENDADA COMO PERMISIBLE PARA TORRES A CONTRA FLUJO Y A FLUJO CRUZADO

En la figura no. 2.18 se muestra y se proporcionan los factores de corrección de la temperatura de bulbo húmedo para la máxima recirculación y la recirculación permitida. Y

en la tabla no. 2.1 se indican los factores de corrección para rangos y acercamientos diferentes a los considerados en la figura no. 2.18

TABLA 2.1: FACTORES DE CORRECCIÓN

Las recirculaciones permisibles mostradas en la curva anterior, están basadas en un rango de enfriamiento de 20 °F y un acercamiento de 10 °F, para cualquier temperatura de bulbo húmedo. la recirculación permisible para otras condiciones diferentes a las anteriores, pueden obtenerse multiplicando la recirculación permisible por el factor de corrección obtenido en esta tabla.

ACERCAMIENTO A TBH AMBIENTE	RANGO, °F									
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
5	0.29	0.47	0.64	0.8	0.97	1.14	1.30	1.47	1.63	1.80
6	0.31	0.49	0.68	0.85	1.03	1.20	1.37	1.56	1.73	1.91
7	0.33	0.51	0.71	0.89	1.08	1.25	1.44	1.63	1.83	2.01
8	0.35	0.53	0.74	0.93	1.12	1.30	1.50	1.70	1.91	2.10
9	0.37	0.55	0.76	0.97	1.16	1.35	1.56	1.77	1.97	2.18
10	0.39	0.57	0.78	1.00	1.20	1.40	1.62	1.83	2.04	2.25
11	0.41	0.59	0.81	1.04	1.24	1.45	1.66	1.88	2.09	2.31
12	0.43	0.61	0.84	1.07	1.27	1.49	1.70	1.92	2.13	2.36
13	0.45	0.63	0.86	1.10	1.30	1.52	1.74	1.96	2.17	2.40
14	0.46	0.65	0.88	1.13	1.33	1.55	1.77	1.99	2.21	2.44
15	0.47	0.67	0.90	1.15	1.36	1.57	1.80	2.02	2.25	2.47
16	0.49	0.69	0.93	1.18	1.39	1.61	1.83	2.06	2.29	2.52
17	0.51	0.70	0.95	1.20	1.42	1.64	1.86	2.10	2.33	2.57
18	0.52	0.72	0.97	1.22	1.44	1.66	1.89	2.13	2.37	2.61
19	0.53	0.74	0.99	1.24	1.46	1.68	1.92	2.16	2.40	2.64
20	0.54	0.75	1.0	1.26	1.48	1.70	1.95	2.19	2.43	2.67
21	0.55	0.77	1.02	1.28	1.50	1.73	1.98	2.22	2.46	2.70
22	0.56	0.79	1.04	1.3	1.52	1.76	2.00	2.25	2.49	2.73
23	0.557	0.80	1.05	1.31	1.54	1.78	2.02	2.27	2.52	2.76
24	0.58	0.81	1.06	1.32	1.56	1.80	2.04	2.29	2.54	2.79
25	0.58	0.82	1.07	1.33	1.57	1.82	2.06	2.31	2.56	2.81

La temperatura de bulbo húmedo de diseño, se obtiene adicionándole la recirculación admisible expresada en °F, a la temperatura de bulbo húmedo ambiente seleccionada para el área donde se construirá la torre de enfriamiento.

CAPÍTULO 3.- FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE ANÁLISIS DE INVERSIONES.

3.0 FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE ANÁLISIS DE INVERSIONES.

El éxito de todo proyecto de ingeniería y de negocios generalmente se mide en términos de eficiencia financiera; por lo que es poco probable que un proyecto alcance su éxito financiero máximo a menos que esté adecuadamente planeado, por lo que siendo la rama de ingeniería el área involucrada con las cuestiones técnicas de los proyectos, es frecuente que se vea involucrada en este tipo de estudios en los que se combinan tanto las cuestiones técnicas como las cuestiones financieras de un proyecto, para que en base a análisis llegar a una conclusión para plantear y tomar una decisión en cuanto a la utilidad (beneficio) de un proyecto de ingeniería en relación a su costo; ya que en realidad un proyecto solo se justifica cuando la utilidad es mayor que el costo de este; por esta razón es necesario contar con las herramientas necesarias que respalden la decisión a tomar o en nuestro caso, analizar y cuantificar financieramente las alternativas que se tienen para compararlas, y poder decidir e identificar la alternativa técnica que produzca la mayor utilidad y/o rentabilidad.

La importancia de la cuestión financiera de los proyectos estriba en que al capital en realidad se puede considerar como un material de producción y de construcción, tal y como lo pueden ser los equipos de procesos (bombas, reactores, válvulas, tuberías) o como lo son el concreto y el acero en una construcción, por lo que es esencial que el manejo del capital sea adecuadamente planeado y utilizado en forma eficaz como cualquier otro material, para poder obtener los resultados óptimos y de esta forma los más adecuados.

Por otro lado la importancia de los estudios económicos, radica en que la mayoría de los problemas ingenieriles tienen más de una solución, o pueden realizarse en más de una forma. Por lo que los estudios económicos tienen que ver con las diferencias en los resultados económicos de alternativas, que es donde radica la importancia de estos estudios, ya que si no se tuvieran diferentes alternativas, no habría la necesidad de realizar los análisis económicos.

en general, el análisis de los estudios económicos (o de ingeniería económica), comprende las siguientes etapas:

1) **Identificación y establecimiento del problema.**

Que para el caso del presente trabajo radica en eliminar los problemas ocasionados por la falta de capacidad de enfriamiento de la torre de enfriamiento 32E-1, que da servicio al área Bechtel de la refinería de Salamanca, Gto; así como eliminar los problemas operacionales ocasionados por la imposibilidad de dar mantenimiento a esta torre

2) **Identificación de todas las posibles alternativas de solución.**

en el presente trabajo, las soluciones al problema de la falta de capacidad térmica y de mantenimiento de la torre de enfriamiento son dos:

- a) Rehabilitar la actual torre de enfriamiento estando esta en operación, debido a la imposibilidad de sacar de operación a todas las plantas a las que da servicio esta torre de enfriamiento.
- b) Construir una nueva torre de enfriamiento, con un diseño más flexible y acorde a las necesidades de la configuración de las plantas que reciben servicio de esta torre de enfriamiento y con la capacidad suficiente para poder satisfacer la carga térmica actual.

Cuando nos enfrentamos a una decisión, lo primero que se debe hacer es determinar los posibles puntos de acción que se pueden seguir. En esta etapa de la toma de decisión se requiere que se generen todas las alternativas disponibles; para esto se debe tener especial cuidado y la certeza de que ya se han agotado los diferentes cursos de acción, antes de que una decisión sea tomada, ya que sería muy indeseable descubrir una mejor alternativa después de haber evaluado las que resultaran no ser las más adecuadas.

3) **Evaluación de las alternativas y selección de la más conveniente.** En esta etapa se aplican los métodos de evaluación de proyectos o ingeniería económica para estimar todos los costos y beneficios de cada alternativa, para de esta forma seleccionar la más adecuada.

Una vez que las alternativas han sido generadas y sus consecuencias cuantificadas y evaluadas, el siguiente paso es utilizar un procedimiento general que ayude a seleccionar a la mejor de ellas.

Dentro de los métodos de análisis económicos podemos distinguir a **los empíricos y los cuantitativos**. La diferencia en estos métodos radica en que estos últimos se utilizan técnicas numéricas que auxilian para visualizar mejor la diferencia entre las alternativas, mientras que con los primeros solo se hace una apreciación subjetiva de dichas diferencias, por lo que al usar métodos cuantitativos nos llevará a ser más consistentes en nuestras decisiones, debido a que siempre se utilizará la misma lógica para la solución del problema.

3.1 VARIABLES RELEVANTES DENTRO DE LA INGENIERÍA ECONÓMICA.

Dentro de la ingeniería económica existen variables fundamentales que sustentan y dan pie a todos los desarrollos matemáticos de los análisis de inversiones; dentro de estas variables fundamentales podemos mencionar las siguientes.

- **i**: Intereses.
- **n**: Número de periodos de capitalización o duración de la inversión (en meses o años).
- **P**: Capital: suma presente de dinero de una suma de egresos e ingresos o capital inicial, cuando $n=0$.
- **F**: Capital futuro; que corresponde al valor equivalente de uno o más flujos de efectivo en un punto relativo en el tiempo denominado el futuro.
- **A**: Flujo de efectivo al final de cada periodo (o valores equivalentes al final de cada periodo, en una serie uniforme que se prolonga por un número especificado de periodos).
- **G**: Aumento o disminución periódica uniforme de flujos de efectivo o de cantidades (el gradiente aritmético).

3.1.1 INTERESES.

El interés representa la renta que se paga por utilizar el dinero ajeno o bien la renta que se gana al invertir nuestro dinero. Puesto que estas dos situaciones se presentan en innumerables formas, es conveniente desarrollar una serie de fórmulas con las cuales se pueda evaluar correctamente el rendimiento obtenido de una inversión o el costo que

representa un financiamiento para el interés, el cual se divide en dos categorías: el interés simple y el interés compuesto.

La diferencia fundamental entre el interés simple y el interés compuesto es que cuando se utiliza interés compuesto, los intereses a su vez generan intereses, mientras que cuando se utiliza interés simple, los intereses únicamente son función del capital, del número de periodos y de la tasa de interés. Siendo el interés compuesto el más frecuentemente utilizado en las transacciones reales.

De esta forma y de acuerdo a lo antes expuesto, podemos decir que el interés simple queda representado por la siguiente fórmula

$$I = P n i \quad (\text{Ec. 3.1})$$

3.1.2 FLUJO DE EFECTIVO.

Para el desarrollo de las fórmulas de equivalencia que relacionan la cantidad presente con la cantidad futura, es recomendable el uso de diagramas de flujo de efectivo para poder tener una mejor visualización de lo que pasa cuando se tienen flujos de dinero en varios puntos del tiempo.

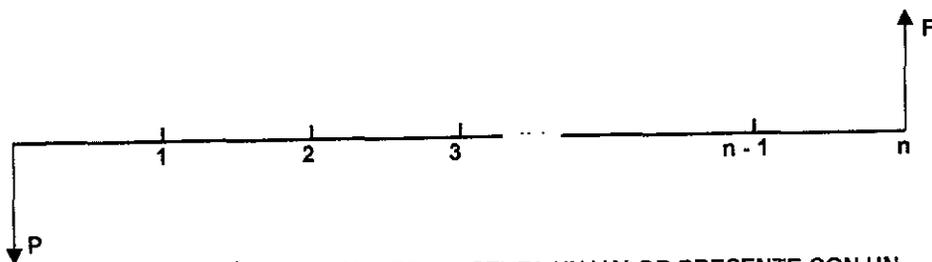


FIGURA 3-1 DIÁGRAMA QUE REPRESENTA UN VALOR PRESENTE CON UN VALOR FUTURO

En la figura 3-1, P representa el desembolso inicial, el cual ocurre al principio del primer periodo, F la cantidad que se va a recuperar al final del período n, y n representa el número de periodos durante el cual se estará ganando el interés i% y como se indicó anteriormente que para la mayoría de las transacciones se realizan utilizando el interés compuesto, tenemos que la cantidad acumulada al final del primer periodo será $P + Pi$,

la cual es equivalente a $P(1+i)$ y la cantidad acumulada al final del segundo periodo, sería la cantidad que se tiene al principio del segundo periodo $P(1+i)$, más los intereses generados por esta cantidad $P(1+i)i$, de forma tal que la cantidad acumulada al final del segundo periodo sería $P(1+i)^2$. de manera tal que si seguimos esta serie se pueden obtener las cantidades que se acumulan en los siguientes periodos tal como se muestra en la tabla no. 3-1.

TABLA 3-1: DESARROLLO DEL FACTOR QUE RELACIONA EL CAPITAL PRESENTE CON EL CAPITAL FUTURO.

AÑO	CANTIDAD ACUMULADA AL PRINCIPIO DEL AÑO	INTERESES GANADOS	CANTIDAD ACUMULADA AL FINAL DEL AÑO	
1	P	Pi	P + Pi	= P (1 + i)
2	P (1 + i)	P (1 + i) i	P (1 + i) + P (1 + i) i	= P (1 + i) ²
3	P (1 + i) ²	P (1 + i) ² i	P (1 + i) ² + P (1 + i) ² i	= P (1 + i) ³
n	P (1 + i) ⁿ⁻¹	P (1 + i) ⁿ⁻¹ i	P (1 + i) ⁿ⁻¹ + P (1 + i) ⁿ⁻¹ i	= P (1 + i) ⁿ

De esta tabla se puede observar que la fórmula que relaciona una cantidad presente con una cantidad futura es:

$$F = P(1+i)^n \quad (\text{Ec. 3-2})$$

De esta forma para obtener la cantidad que se acumula después de n periodos a una tasa de interés de i%, solamente se multiplica la cantidad presente p por el factor $(1+i)^n$, el cual generalmente se denota por la identidad (f/p, i%, n).

Del mismo modo para determinar el capital presente que se tiene que invertir, de forma tal que durante n periodos a una tasa de interés i%, se pueda acumular una cantidad F, se obtiene rearreglando la ecuación 3-2 para que nos quede de la siguiente manera.

$$P = F \frac{1}{(1+i)^n} \quad (\text{Ec. 3-3})$$

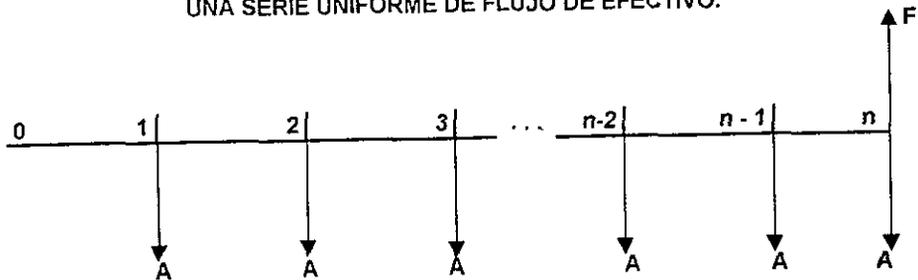
En donde al factor $1/(1+i)^n$ se le denota con la identidad (P/F, i%, n).

3.1.3 VALOR FUTURO DE UNA SERIE UNIFORME DE FLUJOS DE EFECTIVO.

Existen situaciones en las que se tienen depósitos constantes al final de cada período o percepciones de ingresos al final de cada período, las cuales no pueden ser tratadas como si fueran flujos de efectivos únicos.

Para determinar la equivalencia en el futuro de una serie uniforme de flujo de efectivo, es necesario introducir una nueva variable, la cual se denotará por A , esta variable representa el flujo neto el final del período, el cual ocurre durante n periodos. de manera que la cantidad acumulada F al final del año n , se puede obtener al sumar la equivalencia (al final del período n) de cada una de las A 's.

FIGURA 3-2: DIAGRAMA DE FLUJO QUE RELACIONA UNA CANTIDAD FUTURA CON UNA SERIE UNIFORME DE FLUJO DE EFECTIVO.



En la figura 3-2 la equivalencia de la última A en el tiempo n es A , puesto que este flujo no produce ningún tipo de interés, sin embargo la penúltima A produce interés durante un período por lo que su equivalencia durante el tiempo n es $A(1 + i)$. De este modo y siguiendo la lógica seguida en la serie anterior, la primera A produce interés durante $n-1$ periodos, por lo que su equivalencia en el tiempo n es $A(1 + i)^{n-1}$; de este modo sumando las equivalencias de las nA 's tenemos:

$$F = A [1 + (1 + i) + (1 + i)^2 + \dots + (1 + i)^{n-1}] \quad (\text{Ec. 3-4})$$

La cual se reduce a los siguientes términos:

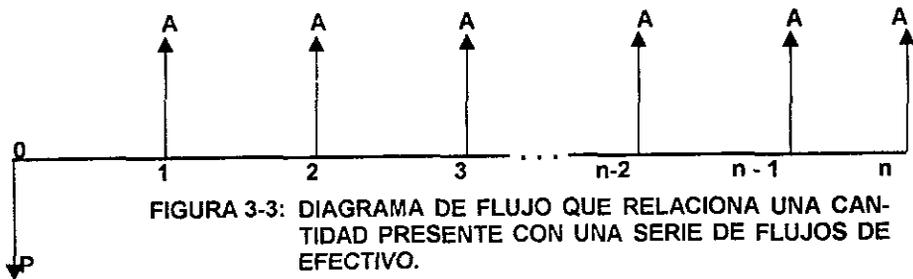
$$F = A \left(\frac{(1+i)^n - 1}{i} \right) \quad \text{Ó} \quad F = A (F/A, i\%, n) \quad (\text{Ec. 3-5})$$

La ecuación 3-5 también puede ser expresada de la siguiente manera:

$$A = F \left(\frac{i}{(1+i)^n - 1} \right) \quad \text{Ó} \quad A = F(A/F, i\%, n) \quad (\text{Ec. 3-6})$$

De esta forma, con esta última ecuación se puede determinar el flujo neto a al final de cada periodo durante n periodos, que es necesario desembolsar para acumular al final del periodo n una cantidad F .

3.1.4 VALOR PRESENTE DE UNA SERIE UNIFORME DE FLUJOS DE EFECTIVO (ENCONTRAR P DADA A).



Este tipo de serie relacionan el capital en el presente con una serie uniforme de flujos de efectivo. para determinar esta equivalencia en el tiempo cero de estos flujos netos de efectivo al final de cada periodo durante n periodos, se puede proceder en igual forma que en la serie anterior, es decir la equivalencia en el tiempo cero de esta serie uniforme de flujos de efectivo, se puede obtener al sumar la equivalencia en el tiempo de cada una de las nA 's.

Por ejemplo la equivalencia en el tiempo cero del primer flujo es $A/(1+i)$ y la equivalencia del segundo es $A/(1+i)^2$. de esta forma la equivalencia del último flujo en el tiempo cero es $A/(1+i)^n$; por lo que al sumar todas estas equivalencias tenemos:

$$P = A \left(\frac{1}{(1+i)} + \frac{1}{(1+i)^2} + \dots + \frac{1}{(1+i)^n} \right) \quad (\text{Ec. 3-7})$$

de forma tal que simplificando la ecuación 3-7 nos queda de la siguiente forma:

$$P = A \left(\frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \right) \quad \text{Ó} \quad P = A (P/A, i\%, n) \quad (\text{Ec. 3-8})$$

Así mismo la ecuación 3-8 se puede reorganizar, de forma tal que se pueda utilizar para determinar la cantidad A que se deberá aportar (o recibir) al final de cada periodo durante los n periodos, si en el periodo cero se invierte o recibe una cantidad P.

$$A = P \left(\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right) \quad \text{Ó} \quad A = P (A/P, i\%, n) \quad (\text{Ec. 3-9})$$

3.2 MÉTODOS BÁSICOS PARA LA EVALUACIÓN DE LA RENTABILIDAD DE LAS ALTERNATIVAS DE UN PROYECTO.

Para que una inversión de un proceso de manufactura valga la pena, debe rendir más que el costo del capital; cuando mayores sean las ganancias adicionales, más rentable será el proyecto y mayor será la justificación para poner en riesgo el capital; por lo que la estimación de la rentabilidad de un proyecto, se puede traducir como un método para cuantificar el riesgo que se toma en un proyecto.

El concepto del valor del dinero a través del tiempo, revela que los flujos de efectivo pueden ser trasladados a cantidades equivalentes a cualquier punto del tiempo, para lo cual existen los siguientes procedimientos, que comparan estas cantidades equivalentes, y que en general son los métodos básicos para la elaboración de los estudios económicos, los cuales son:

- ◆ TASA INTERNA DE RENDIMIENTO (T.I.R.).
- ◆ TASA EXPLÍCITA DE RENDIMIENTO SOBRE LA REINVERSIÓN (T.E.R.).

- ◆ VALOR ANUAL (V.A.)
- ◆ VALOR PRESENTE NETO (V.P.N.).

Los métodos anteriores son equivalentes, es decir si un proyecto es analizado correctamente con cada uno de estos métodos, la decisión recomendada será la misma; la selección del método a utilizar dependerá del problema que se valla a analizar, de las preferencias del análisis y de cual arroja los resultados en una forma que sea fácilmente comprendida por las personas involucradas en el proceso de toma de decisiones.

3.2.1 MÉTODO DE LA TASA INTERNA DE RENDIMIENTO (T.I.R.).

El método de la tasa interna de rendimiento es el más general y más ampliamente usado para la elaboración de estudios económicos, por lo general se le conoce por varios nombres, tales como método del inversionista, método del flujo de efectivo descontado, método de ingresos vs desembolsos e índice de reutilidad.

La tasa interna de rendimiento, es un índice de rentabilidad ampliamente aceptado. Y esta definida como la tasa de interés que reduce a cero el valor presente, el valor futuro o el valor anual equivalente de una serie de ingresos y egresos. Es decir, la tasa interna de rendimiento de una propuesta de inversión, es aquella tasa de interés i^* que satisface cualquiera de las siguientes ecuaciones. o en otros términos podemos decir que la tasa de rendimiento o rentabilidad es una medida de la efectividad financiera; en el método de la T.I.R. los flujos de efectivo positivos y negativos de un proyecto se relacionan por medio de una tasa de interés o de rendimiento, por lo que también se le conoce como tasa interna de rendimiento (utilidad).

Puesto que para cualquier conjunto de relaciones desembolsos-ingresos, existe una utilidad que convertirá en cero el valor de la inversión al final del periodo de tiempo, con lo que las relaciones se pueden escribir de la siguiente forma.

$$\sum_{t=0}^n \frac{S_t}{(1 + i^*)^t} = 0 \quad (\text{Ec. 3-10})$$

$$\sum_{t=0}^n S_t(1+i^*)^{n-t} = 0 \quad (\text{Ec. 3-11})$$

$$\sum_{t=0}^n S_t(P/F, i^*, t)(A/P, i^*, n) = 0 \quad (\text{Ec. 3-12})$$

En donde:

S_t = Flujo de efectivo del periodo t

n = Vida o periodo de la propuesta de inversión.

A = Anualidad equivalente.

F = Valor futuro.

Por lo que la tasa de interés o de utilidad i^* que cumple esta condición y que satisface las ecuaciones (3-10 a 3-12) es la tasa interna de rendimiento.

En términos económicos la tasa interna de rendimiento representa el porcentaje o la tasa de interés que se gana sobre el saldo no recuperado de una inversión. Por lo que el saldo no recuperado de una inversión, en cualquier momento de la vida del proyecto, puede ser visto como la porción de la inversión original que aún permanece sin recuperar en ese tiempo; además el saldo no recuperado de una inversión al tiempo t , se evalúa de acuerdo a la siguiente expresión.

$$F_t = \sum_{j=0}^n S_j(1+i^*)^{t-j} \quad (\text{Ec. 3-13})$$

Es decir, el saldo no recuperado de una propuesta de inversión en el tiempo t , es el valor futuro de la propuesta en ese tiempo; o también el saldo no recuperado de una inversión en el tiempo t , se puede encontrar de acuerdo a la siguiente expresión:

$$F_t = F_{t-1}(1+i^*) + S_t \quad (\text{Ec. 3-14})$$

Una de las equivocaciones más comunes que se cometen con el significado de la TIR, es considerarla como la tasa de interés que se gana sobre la inversión inicial requerida por la propuesta. Sin embargo lo anterior es correcto solamente en el caso de propuestas cuyas vidas sean de un período.

En conclusión, el significado fundamental de la TIR lo podemos definir como: **"Es la tasa de interés que se gana sobre el saldo no recuperado de una inversión, de tal modo que el saldo al final de la propuesta es cero"**.

Por otro lado una buena tasa de rendimiento a usarse inicialmente para empezar los cálculos es aquella por debajo de la cual no se consideraría justificado hacer la inversión. Enseguida se puede hacer el segundo conjunto de cálculos usando una tasa de utilidad mayor o menor, dependiendo de si el valor presente neto, de acuerdo con la primera tasa de utilidad, es el positivo o el negativo, respectivamente.

Con el método de la tasa interna de rendimiento, es necesario calcular la tasa de interés (i^*) que satisfaga cualquiera de las ecuaciones 3-10, 3-11 y 3-12 y compararla con la tasa de recuperación mínima atractiva (TREMA). Y cuando i^* sea mayor que la TREMA, conviene que el proyecto sea emprendido.

El método de la tasa interna de rendimiento así como los otros métodos de análisis, son equivalentes, es decir, que para un mismo proyecto, con cada uno de estos métodos se llegaría a la misma decisión. Lo anterior puede ser más fácilmente comprendido si se observa la figura 3-4.

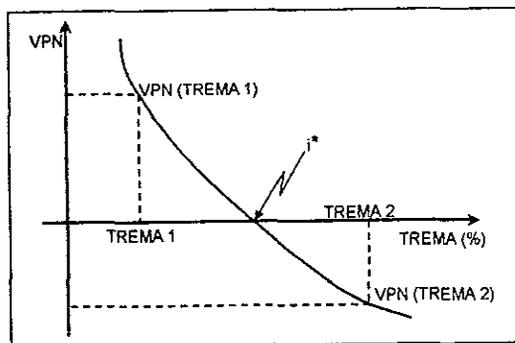


FIGURA 3-4: VALOR PRESENTE NETO Y SU RELACIÓN CON EL MÉTODO DE LA TIR

A través de esta figura, se puede comparar la equivalencia del método de la TIR y el método del valor presente neto. Por ejemplo, en dicha figura se puede apreciar que si i^* es mayor que la TREMA, entonces VPN (TREMA1) es mayor que cero. Por el contrario, si i^* es menor que TREMA, entonces VPN (TREMA2) es menor que cero. Por consiguiente, es obvio que con ambos métodos se llegaría a la misma decisión de aceptar o rechazar el proyecto.

3.2.1.1 PROYECTOS CON UNA TASA INTERNA DE RENDIMIENTO.

Debido a que las propuestas con una sola tasa interna de rendimiento son más fáciles de analizar, lo que las hace más deseables en los estudios económicos, es necesario conocer las condiciones que se tienen que cumplir para que se garantice la existencia de una sola tasa de rendimiento. Se puede decir por norma general que toda propuesta de inversión cuyos desembolsos ocurran en los primeros periodos de su vida, y los ingresos en los periodos posteriores, y además se cumple que la suma absoluta de los ingresos es mayor que la suma absoluta de los egresos, tendrá una función de valor presente similar a la presentada en la figura 3-4, es decir la propuesta tendría una sola tasa interna de rendimiento.

3.2.2 MÉTODO DE LA TASA EXPLÍCITA DE RENDIMIENTO SOBRE LA REINVERSIÓN (T.E.R.).

El método de la tasa explícita de rendimiento sobre la reinversión (T.E.R) es una forma fácil de calcular una tasa de rendimiento cuando hay una sola inversión y ahorros o ingresos uniformes de efectivo al final de cada periodo durante toda la vida del proyecto de inversión. el patrón básico de este método para el cálculo de la tasa de rendimiento es como sigue:

Ingresos Anuales - Gastos Anuales = Ingresos Brutos = G.

Gastos Desembolsables para Operación y Mantenimiento = O + M.

Mano de Obra Directa.

Materiales Directos.

Todos los costos indirectos, incluyendo impuestos a la propiedad, excepto depreciación.

Depreciación: $(C - CL) (A/F, i\%, L) = D$.

Utilidades Netas Antes de Impuestos = $E_b = G - (O + M + D)$.

Tasa anual de rendimiento sobre la inversión requerida, C (antes de impuestos) = $E_b / (C * 100)$.

Una consideración clave en el método de la T.E.R. es la tasa de interés (o de utilidad) que se supone van a redituar el dinero recuperado a través de la depreciación. Si el capital recuperado a través de la depreciación se retiene y usa en la empresa, como generalmente sucede, la tasa de interés para el cálculo de la depreciación debe ser la tasa de utilidad que reditarán estos fondos

3.2.3 MÉTODO DEL VALOR ANUAL EQUIVALENTE.

Con el método del valor anual equivalente, todos los ingresos y gastos que ocurren durante un periodo son convertidos a una anualidad equivalente (uniforme). Cuando dicha anualidad es positiva, entonces, es recomendable que el proyecto sea aceptado. Este método es muy popular porque la mayoría de los ingresos y gastos que origina un proyecto son medidos en bases anuales. Esta característica hace al método más fácil de aplicar y de entender que los otros métodos mencionados.

El método del valor anual equivalente es similar al método del T.E.R. con una sola importante excepción. Y es que se incluye como costo una utilidad mínima requerida (U.M.R.) sobre el capital invertido. El criterio para este método es que mientras que el excedente de los ingresos sobre los costos sea cero o positivo, entonces un proyecto está económicamente justificado.

Sin embargo, este criterio de decisión puede resultar peligroso si en la determinación de la anualidad neta se utiliza como tasa de interés i el costo de capital (costo ponderado de las fuentes de financiamiento utilizadas para financiar los proyectos de inversión). Puesto que se corre el riesgo de que las utilidades proyectadas sean demasiado bajas comparadas con la inversión total a realizar, por lo que sería insuficiente a futuro

reemplazar los equipos. Por consiguiente se recomienda usar el criterio de decisión de aceptar si la anualidad equivalente es positiva), pero utilizando como tasa de interés una tasa mayor que el costo del capital a la cual se le denotara como TREMA (tasa de recuperación mínima atractiva). De esta manera, no existe ningún riesgo de aceptar proyectos con una anualidades cercanas a cero, ya que en el caso crítico de tener un proyecto con una anualidad de cero, significaría que el rendimiento obtenido es exactamente igual al mínimo requerido. Además, el utilizar como valor de i la TREMA, tiene la ventaja de ser establecido muy fácilmente, porque en ella se pueden considerar factores tales como: 1) el riesgo que representa un determinado proyecto; 2) la disponibilidad de dinero de la empresa; y 3) la tasa de inflación prevaleciente en la economía nacional.

Las fórmulas generales que se pueden utilizar para determinar la anualidad equivalente de un proyecto de inversión son:

$$A = -p(A/p, i\%, n) + \left[\sum_{t=1}^n S_t / (1+i)^t \right] (A/P, i\%, n) + F(A/F, i\%, n) \quad (\text{Ec. 3-15})$$

Donde.

A= Anualidad equivalente.

p= Inversión inicial.

S_t = Flujo de efectivo neto del año t.

F= Valor de rescate.

n= Número de años de vida del proyecto.

i= Tasa de recuperación mínima atractiva (TREMA).

Así mismo la ecuación 3-15 se puede representar mediante identidades, quedándonos de la siguiente forma:

$$(A/p, i\%, n) = (A/F, i\%, n) + i\% \quad (\text{Ec. 3-16})$$

Y si además suponemos que todos los flujos de efectivo netos de todos los años son iguales, la ecuación 3-16 se transforma en:

$$A = S - \{(p - F) (A/p, i\%, n) + F(i\%)\} \quad (\text{Ec. 3-17})$$

3.2.4 MÉTODO DEL VALOR PRESENTE NETO.

El método del valor presente neto es uno de los criterios económicos más ampliamente utilizado en la evaluación de proyectos de inversión. Consiste en determinar la equivalencia en el tiempo cero de los flujos de efectivo futuros que genera un proyecto y comparar esta equivalencia con el desembolso inicial. Cuando dicha equivalencia es mayor en el desembolso inicial, entonces, es recomendable que el proyecto sea aceptado

En general la fórmula utilizada para evaluar el valor presente de los flujos generados en un proyecto de inversión es.

$$VPN = S_0 + \sum_{t=1}^n S_t / (1 + i)^t \quad (\text{Ec. 3-18})$$

En donde:

VPN = Valor presente neto.

S_0 = Inversión inicial.

S_t = Flujo de efectivo neto del periodo t.

n = Número de periodos de vida del proyecto.

i = Tasa de recuperación mínima atractiva.

La ecuación anterior considera el valor del dinero a través del tiempo al seleccionar un valor adecuado de i. Es conveniente mencionar que algunos autores utilizan como valor de i el costo de capital (ponderado de las diferentes fuentes de financiamiento que utiliza la empresa) en lugar de TREMA (tasa de recuperación mínima atractiva). Sin embargo, existen algunas desventajas al usar como valor de i el costo del capital. Algunas de estas desventajas son: 1) es difícil de evaluar y actualizar y 2) puede conducir a tomar malas decisiones puesto que al utilizar el costo del capital, proyectos con valores presentes

positivos cercanos a cero serían aceptados. Por otra parte al utilizar como valor de i la TREMA, tiene la ventaja de ser establecida muy fácilmente, además es muy fácil considerar en ella el riesgo que representa un determinado proyecto, la disponibilidad de dinero de la empresa y la tasa de inflación prevaleciente en la economía del país.

Aunado a las características anteriores, el método del valor presente tiene la ventaja de ser siempre único, independientemente de que sigan los movimientos de flujo de efectivo que genera el proyecto de inversión. Esta característica de este método lo hace ser preferido para utilizarse en situaciones en que el comportamiento irregular de los flujos de efectivo, origina el fenómeno de la tasa múltiple de rendimiento.

Es conveniente mencionar que en la mayoría de los casos, el valor presente neto para diferentes valores de i se comporta como se indica en la figura 3-5. lo anterior se debe a que generalmente todos los proyectos de inversión demandan desembolsos en su etapa inicial y generan ingresos en lo sucesivo. Sin embargo, no se debe descartar la posibilidad de encontrar proyectos de inversión con gráficas completamente diferentes a la aquí mostrada.

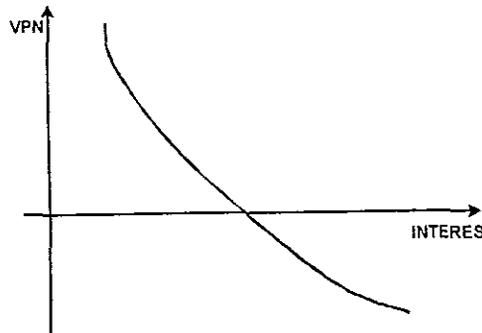


FIGURA 3-5: VALOR PRESENTE NETO COMO UNA FUNCIÓN DE LA TASA DE INTERÉS. CASO MÁS FRECUENTE.

Para ilustrar como el método del valor presente neto se puede aplicar al análisis y evaluación de un proyecto individual, suponga que cierta empresa planea hacer una inversión en equipo relacionado con el manejo de materiales. Se estima que el nuevo equipo tiene un valor en el mercado de \$100,000.00 y representará para la compañía un ahorro en mano de obra y desperdicio de materiales del orden de \$40,000.00 anuales.

Considérese también que la vida estimada para el nuevo equipo es de 5 años, al final de los cuales se espera una recuperación monetaria de \$20,000.00. por último asuma que esta empresa ha considerado su TREMA en 25%.

Para estos datos si aplicamos la ecuación no. 3-18 se obtiene:

$$VPN = -100,000 + \frac{40,000}{(1 + 0.25)} + \frac{40,000}{(1+0.25)^2} + \frac{40,000}{(1+0.25)^3} + \frac{40,000}{(1+0.25)^4} + \frac{60,000}{(1+0.25)^5}$$

$$VPN = \$14,125.$$

Puesto que el valor presente neto es positivo, se recomienda adquirir el nuevo equipo. De acuerdo a este ejemplo, es obvio que siempre que el valor presente de un proyecto sea positivo, la decisión será emprenderlo. Sin embargo será conveniente analizar la justificación de esta regla de decisión. Primero cuando el valor presente es positivo, significa que el rendimiento que se espera obtener del proyecto de inversión es mayor al rendimiento mínimo requerido por la empresa (TREMA). También, cuando el valor presente de un proyecto es positivo, significa que se va a incrementar el valor del capital de los accionistas.

En el ejemplo anterior la decisión era aceptar el proyecto. Sin embargo, veamos que pasa si en el mismo ejemplo, la empresa en lugar de fijar su TREMA en 25% la hubiera fijado en el 40%.

Para esta nueva modificación el valor presente que se obtiene sería:

$$VPN \approx -100,000 + \frac{40,000}{(1 + 0.4)} + \frac{40,000}{(1+0.4)^2} + \frac{40,000}{(1+0.4)^3} + \frac{40,000}{(1+0.4)^4} + \frac{60,000}{(1+0.4)^5}$$

$$VPN = - \$14,875$$

Y como el valor presente neto es negativo, entonces el proyecto deberá ser rechazado. Lo anterior significa que cuando la TREMA es demasiado grande, existen muchas posibilidades de rechazar los nuevos proyectos de inversión. El resultado anterior es

demasiado obvio, pues lo que un valor grande de TREMA significa que una cantidad pequeña en el presente se puede transformar en una cantidad muy grande en el futuro, o equivalentemente, que una cantidad futura representa una cantidad muy pequeña en el presente. Esto significa que cuando TREMA es pequeña existen mayores posibilidades de aceptación, puesto que en estas condiciones el dinero no tendría ningún valor a través del tiempo.

3.2.4.1 VALOR PRESENTE NETO DE LA INVERSIÓN TOTAL.

Puesto que el objeto en la selección de alternativas es escoger aquella que maximice el valor presente, las normas de utilización de este criterio son muy simples. Todo lo que se requiere hacer es determinar el valor presente de los flujos de efectivo que genera cada alternativa y entonces seleccionar aquella que tenga el valor presente máximo. Sin embargo, conviene señalar que el valor presente de la alternativa seleccionada deberá ser mayor que cero, ya que de esta manera el rendimiento que se obtiene es mayor que el interés mínimo atractivo.

Sin embargo, es posible que en ciertos casos cuando se analizan alternativas mutuamente exclusivas, todas tengan valores presentes negativos. En tales casos la decisión a tomar es "no hacer nada", es decir se deberán rechazar todas las alternativas disponibles. Por otro lado si de las alternativas que se tienen solo se conocen sus costos, entonces la regla de decisión será minimizar el valor presente de los costos; también es conveniente mencionar que bajo esta situación, la alternativa "no hacer nada" no se puede considerar, es decir forzosamente se tendrá que seleccionar una alternativa (la de valor presente mínimo si se consideran los costos con signo positivo).

3.3 DEPRECIACIÓN.

Con excepción de los terrenos, la mayoría de los activos fijos de tienen una vida limitada, es decir ellos serán de utilidad para la empresa por un número limitado de periodos contables futuros; lo anterior significa que el costo de un activo deberá ser distribuido adecuadamente en los periodos contables en los que el activo será utilizado por la

empresa El proceso contable para esta conversión gradual de activo fijo en gasto es llamado depreciación.

Es importante destacar que la depreciación no es un gasto real sino virtual y es considerado como un gasto solamente para propósitos determinados de impuestos a pagar. Cuando las deducciones por depreciación son significativas, el ingreso gravable disminuye. Si el ingreso gravable disminuye, entonces, también se disminuyen los impuestos a pagar y por consiguiente la empresa tendrá disponibles mayores fondos para reinversión.

El concepto de depreciación es muy importante, puesto que depreciar activos en periodos cortos, tiene el efecto de diferir el pago de los impuestos. Además, puesto que el dinero tiene un valor a través del tiempo, es generalmente más deseable depreciar mayores cantidades en los primeros años de vida del activo, ya que es obvio que una empresa prefiere pagar un peso de impuestos dentro de un año que ahora.

Existen varios métodos para el cálculo de la depreciación. Normalmente en la literatura se explican los métodos de la línea recta, el método de suma de años dígitos, y el método de saldos decrecientes; los cuales para su aplicación requieren del conocimiento del costo inicial del activo (el monto original de la inversión, comprende además del precio de bien, los impuestos efectivamente pagados con motivo de la adquisición o importación del mismo a excepción del impuesto al valor agregado, así como las erogaciones por concepto de derechos, fletes, transportes, acarreos, seguros contra riesgo en la transportación, manejo, comisiones sobre compras y honorarios a agentes aduanales), su vida útil, y una estimación del valor de rescate el momento de su venta. sin embargo el método de suma de suma de años dígitos y el método de saldos decrecientes sólo se permiten usar en U.S.A.. por el contrario en México, solo es válido depreciar los activos en línea recta. Tal depreciación se determina en función del tipo de activo y de la actividad industrial en la que son utilizados.

Para dar una idea de cómo la depreciación debe ser evaluada, en la tabla 3-2 se muestra como se deprecian los diferentes activos fijos tangibles y los intangibles utilizados por una empresa.

TABLA No. 3-2: DEPRECIACIÓN DE LOS ACTIVOS DE UNA EMPRESA

a) ACTIVOS INTANGIBLES:	
1. CARGOS DIFERIDOS	5%
2. PATENTES DE INVENCIÓNES, MARCAS, DISEÑOS COMERCIALES O INDUSTRIALES, NOMBRES COMERCIALES, ASISTENCIA TÉCNICA O TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA Y OTROS GASTOS DIFERIDOS, ASÍ COMO LAS EROGACIONES REALIZADAS EN LOS PERÍODOS PREOPERATIVOS.	10%
b) BIENES DE ACTIVO FIJO EMPLEADOS NORMALMENTE POR LOS DIVERSOS TIPOS DE EMPRESAS EN EL CURSO DE SUS ACTIVIDADES	
1. EDIFICIOS Y CONSTRUCCIONES.	5%
2. FERROCARRILES, CARROS DE FERROCARRIL, LOCOMOTORAS Y EMBARCACIONES (EXCEPTO LOS COMPRENDIDOS EN EL INCISO c) No. 8)	6%
3. MOBILIARIO Y EQUIPO DE OFICINA.	10%
4. AUTOMÓVILES, CAMIONES DE CARGA, TRACTOCAMIONES, REMOLQUES Y MAQUINARIA Y EQUIPO PARA LA INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN.	20%
5. AUTOBUSES.	11%
6. AVIONES (EXCEPTO LOS CONTENIDOS EN EL INCISO c) No. 9).	17%
7. EQUIPO DE CÓMPUTO ELECTRÓNICO, CONSISTENTE EN UNA MÁQUINA O EQUIPO DE MÁQUINAS.	25%
8. DADOS, TROQUELES, MOLDES, MATRICES Y HERRAMIENTAS, ASÍ COMO SU EQUIPO PERIFÉRICO.	35%
9. EQUIPO DESTINADO A PREVENIR Y CONTROLAR LA CONTAMINACIÓN AMBIENTAL EN CUMPLIMIENTO DE LAS DISPOSICIONES LEGALES RESPECTIVAS.	35%
10. EQUIPO DESTINADO DIRECTAMENTE A LA INVESTIGACIÓN DE NUEVOS PRODUCTOS O DESARROLLO DE TECNOLOGÍA EN EL PAÍS.	35%
11. EQUIPO DESTINADO PARA LA CONVERSIÓN A CONSUMO DE COMBUSTOLEO Y GAS NATURAL EN LA INDUSTRIA.	35%
c) MAQUINARIA Y EQUIPOS DISTINTOS DE LOS MENCIONADOS EN EL INCISO ANTERIOR, UTILIZADOS POR EMPRESAS DEDICADAS A:	
1. PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA O SU DISTRIBUCIÓN; TRANSPORTES ELÉCTRICOS.	3%
2. MOLIENDA DE GRANOS; PRODUCCIÓN DE AZÚCAR Y DERIVADOS; DE ACEITES COMESTIBLES; TRANSPORTACIÓN MARÍTIMA FLUVIAL Y LACUSTRE.	5%
3. PRODUCCIÓN DE METAL (OBTENIDO EN PRIMER PROCESO); PRODUCTOS DEL TABACO Y DERIVADOS DEL CARBÓN NATURAL.	6%
4. FABRICACIÓN DE VEHÍCULOS DE MOTOR Y SUS PARTES, CONSTRUCCIÓN DE FERROCARRILES Y NAVIOS, FABRICACIÓN DE PRODUCTOS DE METAL, DE MAQUINARIA, Y DE INSTRUMENTOS PROFESIONALES Y CIENTÍFICOS; PRODUCCIÓN DE ALIMENTOS Y BEBIDAS (EXCEPTO GRANOS, AZÚCAR, ACEITES COMESTIBLES Y DERIVADOS).	8%
5. FABRICACIÓN DE PULPA, PAPEL Y PRODUCTOS SIMILARES, PETRÓLEO Y GAS NATURAL.	7%
6. CURTIDO DE PIEL Y FABRICACIÓN DE ARTÍCULOS DE PIEL; DE PRODUCTOS QUÍMICOS, PETROQUÍMICOS Y FARMACOBIOLOGÍCOS; DE PRODUCTOS DE CAUCHO Y DE PRODUCTOS PLÁSTICOS, IMPRESIÓN Y PUBLICACIÓN.	9%
7. CONSTRUCCIÓN DE AERONAVES; COMPAÑÍAS DE TRANSPORTE TERRESTRE, DE CARGA Y DE PASAJEROS.	12%

Como se puede apreciar en la tabla 3-2, la depreciación a la que está sujeta un activo depende principalmente de su vida esperada, es decir entre mayor sea la vida esperada de un activo, menor será la depreciación anual permitida. Así mismo en esta tabla también se indica el porcentaje de depreciación anual del valor inicial del activo que se permite depreciar.

CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE COSTOS DE LAS ALTERNATIVAS DEL PROYECTO.

4.0 ANÁLISIS DE COSTOS DE LAS ALTERNATIVAS DEL PROYECTO.

Como se mencionó anteriormente las inversiones para la instalación de una planta de servicios no tienen que justificarse por la rentabilidad de esta planta en sí, ya que son las utilidades de las plantas de proceso a las que prestan servicio las que deben pagar estos costos de operación e inversión, y son los beneficios que se obtengan en estas plantas los que justifique la rentabilidad de este tipo de obras y como es el caso de estas torres de enfriamiento se espera obtener una mejora en la producción de estas plantas, lo que se reflejaría en un beneficio económico; sin embargo como es el caso es recomendable hacer estudios de factibilidad técnico económicos para seleccionar entre los posibles proyectos y alternativas que se tienen para dar solución a los problemas operacionales que se tienen con la torre de enfriamiento actualmente instalada, y de esta forma poder determinar cual es la alternativa que resulta menos costosa y que por ende hará más rentable, el proyecto.

Como se indico en el punto 3.0, la primera etapa de cualquier estudio económico es definir e identificar el problema; siendo en nuestro caso eliminar los problemas operacionales ocasionados por la torre de enfriamiento actualmente instalada, la cual y debido a su configuración original no cuenta con la flexibilidad suficiente para que esta torre pueda salir de operación para que se le pueda dar mantenimiento, ya que desde la fecha de su construcción no ha podido salir de operación para poder eliminarle el azolve del bacín colector de agua fría, debido a que las 15 celdas de que consta la torre actual descargar el agua fría a un bacín que no cuenta con separación alguna, además de que las celadas no cuentan con paredes que pueda separar a una celda de la otra, lo que ocasiona que cuando una celda sale de operación el aire saturado es recirculado a las celdas que están en operación lo que ocasiona que la torre opere en forma ineficiente, además de que la red de distribución no es la adecuada ya que las plantas no reciben la cantidad suficiente y lo suficientemente fría para poder absorber la carga térmica de cada una de estas, problema que repercute en la disminución de la capacidad de las plantas.

La segunda etapa del estudio corresponde a identificar las posibles soluciones al problema, presentándose en nuestro caso dos posibles soluciones, que corresponden a las indicadas en el punto 3.0, las cuales son:

- a) Rehabilitar la actual torre de enfriamiento estando esta en operación, debido a la imposibilidad de sacar de operación a todas las plantas a las que da servicio esta torre de enfriamiento.
- b) Construir una nueva torre de enfriamiento, con un diseño más flexible y acorde a las necesidades de la configuración de las plantas que reciben servicio de esta torre de enfriamiento y con la capacidad suficiente para poder satisfacer el flujo y la carga térmica actual.

De estas dos opciones por comparar en este estudio, los beneficios a la producción de cualquiera de las obras se espera sean los mismos ya que la rehabilitación y acondicionamiento propuesto para la torre de enfriamiento en la primera opción debe eliminar todas las deficiencias actuales de operación, mantenimiento y capacidad térmica, de la misma manera la nueva torre de enfriamiento deberá cubrir todos los requerimientos actuales y futuros de las plantas de proceso del área atendida.

Si los beneficios esperados de los dos proyectos alternos son iguales, el proyecto a seleccionar es el que tenga menores costos de inversión y operación.

El presente estudio se basa en determinar los beneficios de cada una de las alternativas, con las que se espera permita recuperar la capacidad nominal en las plantas de proceso alimentadas por la torre de enfriamiento, considerándose una operación de 330 días por año para cada una de las plantas.

4.1 DESCRIPCIÓN Y ALCANCE DEL PROYECTO.

La solución que se encontró para eliminar los problemas de operación y mantenimiento en la torre de enfriamiento existente y en las plantas de proceso a que da servicio, es hacer un cambio total, tanto de la configuración de la torre como en los sistemas de distribución de forma tal que satisfagan los requerimientos de la nueva configuración de las plantas, de manera que sea posible sacar de operación una parte de la torre de enfriamiento y del sistema de bombeo cuando un grupo de plantas sale de operación para su mantenimiento, con lo que se ahorraría energía; a la vez que la sección de la

torre que da servicio a estas plantas salga también de operación para poder darle mantenimiento.

Del estudio de las demandas de agua de enfriamiento de cada planta y de la relación operativa entre ellas, se definieron de acuerdo a los programas de mantenimiento de las plantas, se determinó que existen cinco grupos que operan en forma simultánea. De estos grupos, tres tienen una demanda entre 14,000 y 21,000 gpm, por lo que se eligieron como principales para ser abastecidos por una sección de la torre; los otros dos grupos con demandas de 2,800 y 7,300 gpm se anexarán a los grupos de menor demanda pero con la opción de utilizar alternativamente dos secciones de la torre.

Para permitir el mantenimiento de la sección de la torre que dará servicio al grupo de plantas de lubricantes, unidades U-1 A U-4 Y U-6, que normalmente tienen largas corridas de operación, se dejará la posibilidad de abastecer a ese grupo de otra sección de la torre de enfriamiento.

Los grupos de plantas y sus consumos de agua de enfriamiento, se resumen en la tabla no. 4-1.

TABLA No. 4-1

FLUJOS DE AGUA DE ENFRIAMIENTO DE DISEÑO, REQUERIDO POR LAS PLANTAS CONECTADAS A LA RED DE DISTRIBUCIÓN DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO.			
CLAVE	NOMBRE DE LA PLANTA	FLUJO EN GPM.	SECCION No.
IPA	PLANTA DE ALCOHOL ISOPROPÍLICO	2,750	1
U-7	HIDRODESULFURADORA DE INTERMEDIOS	143	1
U-8	HIDRODESULFURADORA DE DIESEL	0	1
U-11	PLANTA DE TRATAMIENTO CON AMINA	2,110	1
U-31	PLANTA DE COMPRESORES DE AIRE	690	1
U-5	PLANTA DESPARAFINADORA DE ACEITE	14,000	1
	SERVICIOS VARIOS	1,600	1
TOTAL DEL GRUPO No. 4		21,293	

U-1	PLANTA DE DESTILACIÓN A VACÍO	2,850	2
U-2	DESASFALTADORA CON PROPANO	9,100	2
U-3	REFINACIÓN CON FURFURAL	5,400	2
U-4	HIDRODESULFURADORA DE DIESEL	850	2
U-6	PLANTA DE HIDRÓGENO	2,400	2

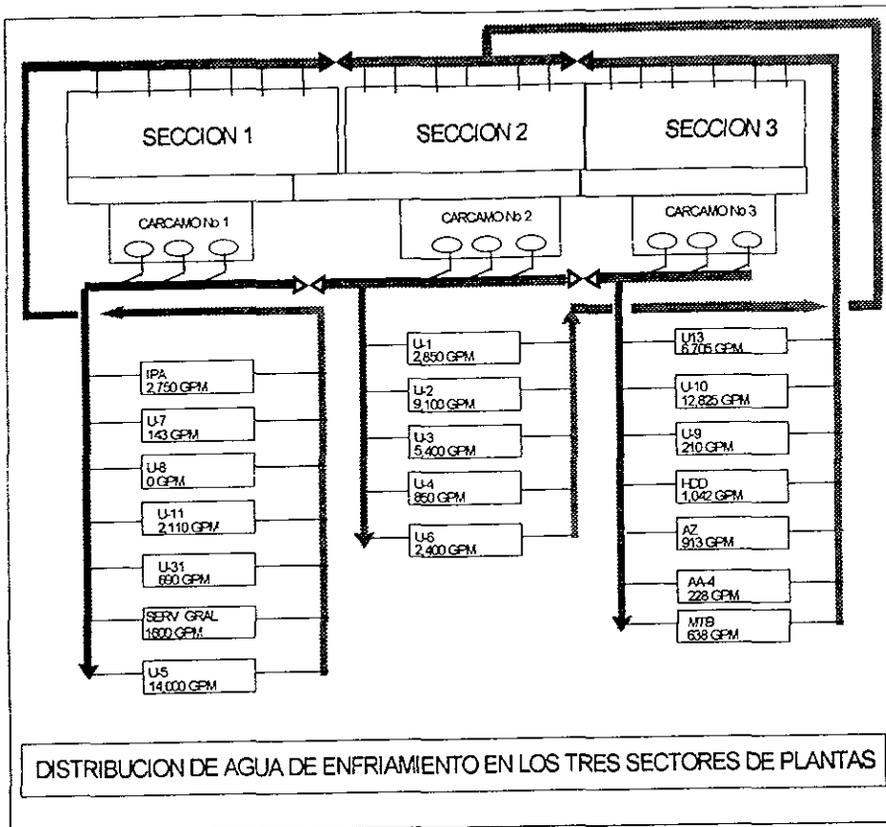
TOTAL DEL GRUPO No 2 20,600

U-9	PLANTA DE HIDRÓGENO	210	3
U-10	PLANTA DE HIDRODESULFURACIÓN DE RESIDUO	12,825	3
HDD	HIDRODESULFURADORA DE INTERMEDIOS	1,042	3
AZ	PLANTA DE AZUFRE	913	3
AA-4	PLANTA DE AGUAS AMARGAS NO.4	228	3
MTBE	PLANTA PRODUCTORA DE MTBE	638	3
U-13	PLANTA DE RECUPERACIÓN DE LIGEROS	6,705	3

TOTAL DEL GRUPO No. 3 22,561

En la figura no.4-1 se muestra la distribución necesaria entre las tres secciones de la torre de enfriamiento para abastecer los cinco grupos de plantas y las conexiones entre los sistemas de distribución.

FIGURA No. 4-1



4.1.1 COSTO DE LA OBRA DE REHABILITACIÓN DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO 32E-1.

Esta torre de enfriamiento actualmente consta de 15 celdas con capacidad de 4,000 gpm cada una, las cuales operan a contraflujo, con doble entrada de aire, con dos ventiladores de flujo axial tiro inducido de 75 hp en cada celda, con cabezales de distribución de agua caliente de acero galvanizado por inmersión y con un solo bacín recolector de agua fría para todas las celdas.

La torre de enfriamiento 32e-1 además de que requiere que sean rehabilitadas las 15 celdas de que consta actualmente, es necesario adicionarle otras tres celdas iguales a las actualmente existentes y dividir el bacín colector de agua fría para conseguir la operación independiente de cada celda, de forma tal que la torre pueda ser dividida en tres secciones; cada una de las cuales tenga una capacidad para manejar normalmente hasta 24,000 gpm. Para que cada sección pueda operar como una torre de enfriamiento independiente con su sistema de bombeo y de distribución de agua propios para cada una de las tres secciones. De forma tal que su nueva configuración sea semejante a la de la figura 4-1 que corresponde a la torre de enfriamiento nueva y con la que se independizarían los bloques de plantas, con lo que se le daría la flexibilidad suficiente para poder sacar de operación y de esta forma darle mantenimiento cuando cada sección de plantas y de la torre salgan de operación.

Las celdas en grupos de tres estarán conectadas a un nuevo canal colector de agua fría, que a su vez, descarga a su correspondiente cárcamo de bombeo. En vista de que los sistemas de distribución de agua serán independientes, es necesario sustituir las bombas actuales e instalarle su sistema de bombeo independiente para cada sección de la torre, bombas verticales con capacidad nominal de 12,000 gpm cada una, 3 bombas por sección.

La torre contará con una nueva caseta de mampostería para operadores ya que la actual será demolida por estorbar la construcción de uno de los nuevos cárcamos. Se aprovecharán las actuales instalaciones de almacenamiento de cloro e inhibidor de corrosión.

La instrumentación para monitoréo de flujos, presión y temperaturas de agua será independiente para cada sección, de igual manera la medición y control de nivel de los bacines, por lo que deberán complementarse la instrumentación adicional.

Como trabajos de rehabilitación de la torre de enfriamiento se deben considerar el cambio de las láminas de la cubierta exterior actualmente de asbesto por otras de fibra de vidrio y en cada una de las celdas actuales. El cambio de relleno, de separadores de rocío, de cabezales de distribución de agua y aspersores.

El costo total de la obra de rehabilitación se indica en la tabla no. 4-2.

TABLA No. 4-2: COSTO DE LA OBRA DE REHABILITACIÓN DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO 32E-1.

EQUIPO	NÚMERO DE EQUIPOS REQUERIDOS	PRECIO UNITARIO	COSTO TOTAL
EQUIPOS			
VENTILADORES	36	16748 61	602949 91
MOTOR-REDUCTOR	36	18956.31	682427.25
CHIMENEAS	6	16251.48	97508.87
SIST DE CONTROL	1	333668 01	333668.01
INSTRUMENTOS	18	32567 65	586217 68
ALUMBRADO	18	778 43	14011.69
BOMBAS	9	95706.44	861357 97
VÁLV DE CONTROL	3	15218 93	45656.79
MATERIALES			
RELLENO	18	42810 97	770597.50
ELIMINADOR DE ARRAST	18	7753 20	139557 66
CAB DE DIST. DE AGUA	18	7439 78	133915 97
VÁLVULAS	4 5	119586.39	538138 75
CABLES AL, FZA Y CONT	18	17164.90	308968.16
OTROS	18	16992 04	305856.77
OBRA MECÁNICA			
INST. DE BOMBAS	9	1279.40	11514.56
INST DE VENT.	36	2284 87	82255 16
INSTALACIÓN DE TUB	9	90669.82	816028.37
INST. OTROS EQUIPOS	9	27418 38	246765.39
OBRA ELÉCTRICA			
CONEXIÓN DE BOM	9	2343.58	21092.20
CONEXIÓN DE VENT	36	10272.77	369819 68
CONEXIÓN DE INST	9	2111.59	19004.35
CONEXIÓN DE ALUMB.	4 5	2650 01	11925 05
CONEXIÓN DE TIERRAS	36	1077.03	38772.92
CABLE CALIBRE 12	10800	0.25	2749.85
CABLE CALIBRE 2/0	10800	5.05	54538.75
CABLE CALIBRE 250	2700	13.58	36664.70
OBRA DE INSTRUMENTACIÓN			
MONTAJE DE MED	3	4569.73	13709 19
MONTAJE DE V. DE CONT	3	5483 68	16451 03
INSTALACIÓN DE PLC (Controlador Lógico Programable)	1	6744.92	6744 92

CONEXIÓN DE INST.	3	7402.96	22208.88
OBRA CIVIL			
CIMENTACIÓN	128	54.41	6984.94
DIVICIÓN DEL BACIN	240	818.70	196487.17
CÁRCAMO DE BOMBEO	3	84513.81	253541.42
PARED DIVISORIA	2812	193.30	543548.30
INTEGRACIÓN DRENAJE	3	11422.98	34266.93
URBANIZACIÓN	1	5346.94	5346.94
DESM. DE INT. EXISTENTES	16	5116.10	92123.60
MONT DE INT NUEVOS	18	4112.79	74030.24
INST DE BOQ. NUEVAS	18	438.68	7896.28
CANAL COLECTOR	164.6	744.22	122498.83
ESTRUCTURA DE LAS CELDAS NUEVAS	3	93383.34	280150.01
OTROS	2	18371.97	36743.93
VÁLVULAS Y TUBERÍAS			
TUBO DE 36" (MT.)	1168	275.02	321218.69
TUBO DE 30" (MT.)	890	205.91	183259.69
TUBO DE 24" (MT.)	270	205.91	55595.64
TUBO DE 16" (MT.)	60	148.21	8892.65
TUBO DE 10" (MT.)	240	172.55	41412.82
VÁLV DE COMP 36"	2	53357.40	106714.80
VÁLV DE COMP. 24"	15	11725.02	175875.37
VÁLV DE COMP. 20"	3	8495.42	25486.25
VÁLV CHECK 20"	9	8972.88	80755.76
SUBESTACIÓN NUEVA			
RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA	1	2652.25	2652.25
GAB. CON INT. DE 1200A	2	30500.88	61001.75
CABLE DE 500 MCM	250	28.86	7214.12
GAB. CON INT DE 1200A	2	0.00	0.00
TRANSF. DE 13.8 A 4 16	4	119351.25	477405.00
CCM			
INT. A VACÍO DE 2000 AMP	2	71610.75	143221.50
ARRANC. DE 400 AMP	13	13128.64	170872.29
TRANSF. DE 416/440	4	53045.00	212180.00
INT. DE 1600 AMP.	6	33153.13	198918.75
ARRANC. DE 2 VEL	36	0.00	0.00
INTERRUPTOR TÉRM	1	0.00	0.00
TRANSF. 45KV, 440/220/127	1	3315.31	3315.31
TABLERO DE ALUMB.	1	901.25	901.25
INT. TERMOMAG. 30A			
CARG. Y BANCO DE BAT	1	9282.88	9282.88
OBRA CIVIL			

DUCTO ELÉCTRICO	250	179 29	44823 03
REGISTROS	10	2437.21	24372.06
SUBESTACIÓN	1	215047.61	215047.61
SIST DE PRESURIZADO	1	430237.92	430237 92
COSTO TOTAL			11845138.13

4.1.2 NUEVA TORRE DE ENFRIAMIENTO

La torre de enfriamiento que requiere esta área de plantas, es una torre dividida en tres secciones, cada una de las cuales con capacidad para manejar normalmente hasta 24,000 gpm. Cada sección operará como una torre de enfriamiento independiente con sistema de bombeo y distribución de agua propios ver figura 4-1; solo compartirá con las otras secciones las celdas de relevo que le permitan el mantenimiento sin interrupción de los servicios, y la posibilidad de dar el servicio alternativo (de dos secciones) a las mismas plantas. Las tres secciones también compartirán la integración de servicios como son: suministros de agua de reposito, subestación eléctrica, almacenamiento de reactivos, urbanización y drenajes.

La torre de enfriamiento estará formada por ocho celdas de concreto, de 10,000 gpm, (máximo de 12,000 gpm.) de flujo cruzado, doble entrada, con ventiladores de flujo axial tiro inducido de 125 hp, con charolas de distribución de agua caliente y bacines colectores de agua fría de operación independiente.

Las celdas en grupos de tres estarán conectadas a un canal colector de agua fría, que a su vez, descarga a su correspondiente cárcamo de bombeo. Las celdas 3 y 6 serán relevos de las secciones 1 ó 2 y 2 ó 3 respectivamente, de manera que conectarán a través de dos salidas a dos canales colectores. La figura no. 4-1 ilustra el arreglo de celdas, retornos y compuertas al canal colector y cárcamos de bombeo.

El bacín de agua fría, canal colector y cárcamos serán construidos de concreto reforzado con los espacios y altura suficientes para la instalación de bombas de circulación verticales con capacidad nominal de 12,000 gpm.

Las chimeneas de las torres serán de fibra de vidrio reforzado con una altura de 14 pies y las charolas de distribución de agua caliente serán cubiertas para impedir el crecimiento orgánico en esas áreas.

La instrumentación para monitoreo de flujos, presión y temperaturas de agua será independiente para cada sección, de igual manera la medición y control de nivel de los bacines.

Los ventiladores y bombas contarán con monitoreo y protección local de vibración con dos sensores por equipo.

4.1.3 SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN

Los cabezales principales de distribución que actualmente dan servicio a las plantas del área Bechtel serán totalmente sustituidos por los tres sistemas de distribución formado por seis cabezales de suministro y retorno que en su origen tendrán un diámetro de 36 pulgadas.

Los cabezales principales de suministro y retorno de las tres secciones tendrán una válvula de comunicación, lo que permitirá la operación en paralelo de estas secciones de la torre de enfriamiento y el suministro alterno a ambos grupos de plantas cuando una sección de la torre salga de operación.

La instalación de los nuevos cabezales de agua de circulación será aérea, aprovechando los espacios que dejará el desmantelamiento de los cabezales actuales y complementando los soportes actuales de tuberías, con la ampliación de los "racks de tuberías aéreas" existentes.

4.1.4 OBRAS DE INTEGRACIÓN

Las obras de integración serán las necesarias para conectar la nueva torre de enfriamiento a los servicios de refinería y los cabezales de agua a las plantas de proceso a que dará servicio.

De la refinería se conectará:

- Agua de repuesto a torres de enfriamiento.
- Aire de instrumentos.
- Aire de plantas
- Suministro de ácido sulfúrico.
- Suministro eléctrico a 13.8 kv a la subestación eléctrica.

A la refinería se conectará.

- El drenaje y derrame de la torre de enfriamiento.
- Los cabezales de salida y retorno de agua de enfriamiento.
- Línea de sangría de 8" Ø para purga de cada sección en la torre a la red de drenajes de la refinería o en su defecto se pueden enviar a las plantas de tratamiento de aguas residuales.

4.1.5 URBANIZACIÓN DEL ÁREA

Dentro del alcance del nuevo proyecto se considera la urbanización del área donde se localizarán las instalaciones descritas. esta parte de la obra incluye:

- La pavimentación aledaña.
- La integración de drenajes pluvial y aceitoso.
- El alumbrado de calles.
- Los accesos para personal y vehículos y el estacionamiento para operadores.

Así mismo el costo estimado para la torre nueva se indica en la tabla no. 4-3; en la cual se indican los equipos materiales y trabajos requeridos para la construcción de esta torre.

TABLA No. 4-3: COSTO DE LA TORRE NUEVA.

EQUIPO	NÚMERO DE EQUIPOS REQUERIDOS	PRECIO UNITARIO	COSTO TOTAL
EQUIPOS			
VENTILADORES	8	18674.70	149397.59
MOTOR-REDUCTOR	8	21136.29	169090.31
CHIMÉNEAS	8	18120.40	144963.19
SIST. DE CONTROL	1	372039.83	372039.83
INSTRUMENTOS	8	36312.93	290503.43
ALUMBRADO	8	867.95	6943.57
BOMBAS	9	106712.68	960414.14
VALV. DE CONTROL	3	16969.11	50907.32
MATERIALES			
RELLENO	8	47734.23	381873.87
ELIMINADOR DE ARRAST. TUBERÍAS	8	8644.82	69158.57
TUBERÍAS	3	255401.53	766204.60
VÁLVULAS	3	133338.82	400016.47
CABLES AL, FZA Y CONT.	8	19138.86	153110.89
OTROS	8	18946.13	151569.02
OBRA MECÁNICA			
INST. DE BOMBAS	9	1426.53	12838.74
INST. DE VENT	8	2547.63	20381.00
INSTALACIÓN DE TUB.	3	101096.85	303290.54
INST OTROS EQUIPOS	3	30571.49	91714.47
OBRA ELÉCTRICA			
CONEXIÓN DE BOM.	9	2613.09	23517.80
CONEXIÓN DE VENT	8	11454.14	91633.10
CONEXIÓN DE INST	3	2354.43	7083.28
CONEXIÓN DE ALUMB.	2	2954.77	5909.53
CONEXIÓN DE TIERRAS	8	1200.88	9607.07
CABLE CALIBRE 12	2400	0.28	681.35
CABLE CALIBRE 00	2400	5.63	13513.49
CABLE CALIBRE 250	2700	15.14	40881.14
OBRA DE INSTRUMENTACIÓN			
MONTAJE DE MED	3	5095.25	15285.75
MONTAJE DE V. DE CONT	3	6114.30	18342.89
INSTALACIÓN DE PLC	1	7520.58	7520.58
CONEXIÓN DE INST.	3	8254.30	24762.90
OBRA CIVIL.			
CIMENTACIÓN	2	11722.35	23444.70
BACÍN	8	40077.55	320620.43
CÁRCAMO DE BOMBEO	3	94232.90	282698.69

ESTRUCTURA DE CEL-DAS	8	104122.42	832979.35
INTEGRACIÓN DRENAJE	2	12736.62	25473.24
URBANIZACIÓN	4	11924.95	47699.78
OTROS	2	20484.74	40969.48
VÁLVULAS Y TUBERÍAS			
TUBO DE 36" (MT.)	2856	308.64	875771.97
TUBO DE 30" (MT.)	840	229.59	192855.09
TUBO DE 16" (MT.)	120	70.62	8474.18
TUBO DE 10" (MT.)	372	192.40	71571.70
VÁLV DE COMP 36"	2	59493.50	118987.00
VÁLV DE COMP 24"	9	13073.40	117660.63
VÁLV DE COMP 20"	14	9472.39	132613.44
VÁLV DE COMP.18"	1	5914.81	5914.81
VÁLV DE COMP.16"	3	5205.04	15615.11
VÁLV DE COMP 14"	1	4495.26	4495.26
VÁLV DE COMP 12"	1	3075.70	3075.70
VÁLV DE COMP.10"	1	2566.56	2566.56
VÁLV DE COMP 6"	1	1279.49	1279.49
VÁLV CHECK 20"	9	10004.74	90042.67
SUBESTACIÓN NUEVA			
RESISTENCIA DE APUESTA ATIERRA	1	2957.26	2957.26
GAB CON INT DE 1200A	2	34008.48	68016.95
CABLE DE 750 MCM	15000	45.78	686675.48
GAB CON INT DE 1200A	2	0.00	0.00
TRANSF DE 13.8 A 4.16	2	133076.65	266153.29
CCM			
INT. A VACÍO DE 2000 AMP	1	79845.99	79845.99
ARRANC. DE 400 AMP.	1	117107.45	117107.45
TRANSF DE 416/440	2	59145.18	118290.35
INT DE 1600 AMP.	3	36965.73	110897.20
ARRANC. DE 2 VÉL	8	0.00	0.00
INTERRUPTOR TÉRM.	1	0.00	0.00
TRANSF. 45KV, 440/220/127	1	3696.57	3696.57
TABLERO DE ÁLUMB	1	1004.89	1004.89
INT. TERMOMAG. 30A			
CARG. Y BANCO DE BAT.	1	10350.41	10350.41
OBRA CIVIL			
DUCTO ELÉCTRICO	1250	199.91	249888.36
REGISTROS	55	2717.48	149461.63
SUBESTACIÓN	1	239778.09	239778.09
SIST. DE PRESURIZADO	1	479715.28	479715.28
COSTO TOTAL			10551784.91

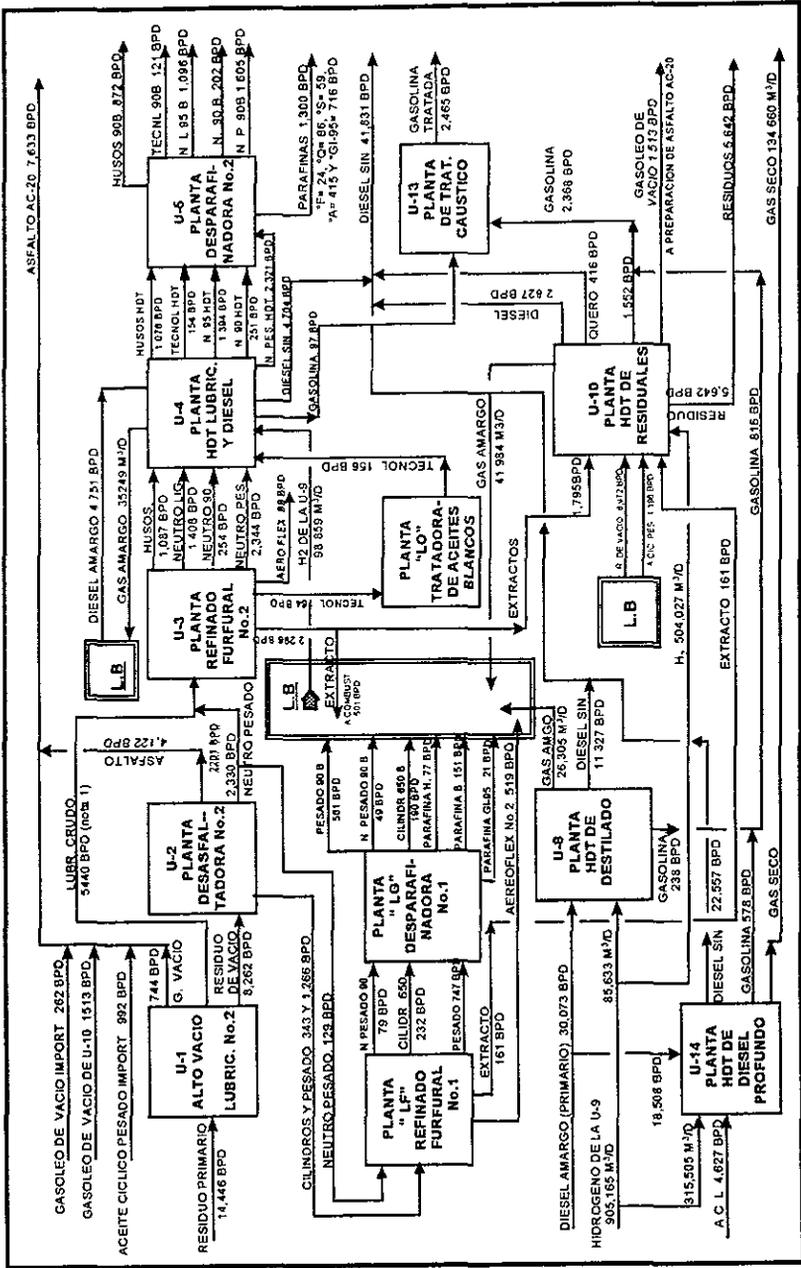
4.2 IMPACTO DE LA REHABILITACIÓN EN LA PRODUCCIÓN Y EN LOS COSTOS.

En la estimación de los costos de cada una de las alternativas se tomaron en cuenta varios factores que en un momento dado influirán en la producción de las diferentes plantas, siendo el principal y más crítico el caso de la rehabilitación de la torre de enfriamiento, puesto que en el proceso de rehabilitación de la torre se disminuirá el flujo de agua de enfriamiento debido a que es necesario sacar de operación tres celdas a la vez para poder realizar las modificaciones requeridas; lo cual se reflejará en el abatimiento de la producción por la disminución del suministro de agua de enfriamiento a las plantas, durante la rehabilitación de la torre.

Para la estimación de esta disminución de la producción, se tomo como base el programa de rehabilitación de la torre y se consideró que al disminuir la capacidad de procesamiento de las plantas de lubricantes, el residuo primario se procesará para producir combustibles, los cuales tienen un menor valor agregado. En la figura no 4-2 se muestra la producción actual de las plantas de proceso que reciben agua de enfriamiento de la torre.

Al disminuir el flujo procesado en las plantas, también disminuirá el requerimiento de servicios auxiliares y de mantenimiento de la planta, por lo que en la estimación de los costos de la disminución de la producción, se va a tomar en cuenta el costo de los servicios auxiliares, de los catalizadores, reactivos y refrigerantes que se dejaron de consumir en las plantas y que se incrementarán en las plantas de lubricantes, ya que el flujo que se deje de procesar se canalizara a estas plantas para producir lubricantes y que se incrementaran al proceso de producción de combustibles.

FIGURA No. 4-2: CAPACIDAD DE PROCESAMIENTO ACTUAL DE LAS PLANTAS



NOTAS 1) AL LUBRICANTE CRUDO LO CONSTITUYEN LOS SIGUIENTES COMPUESTOS USOS= 1.562 BPD, TECNOL= 2.231 BPD, NEUTRO= 342 BPD, NEUTRO PESADO= 1.016 BPD

A.C.I. ACEITE CÍCLICO LIGERO, N.P. NEUTRO PESADO, A.C.P. ACEITE CÍCLICO PESADO, R.V. RECIBIDO DE VACÍO

De acuerdo con el programa de rehabilitación, se estimó que para poder realizar las maniobras de rehabilitación de la torre, es necesario que se saquen de operación tres celdas a la vez, para que de esta forma se pueda dividir el bacín general de la torre en bacines independientes para cada una de las celdas. De esta forma, la disminución en el suministro de agua será de un 20% del flujo actual (el correspondiente al manejado por las tres celdas de las 15 celdas actuales); y se consideró que la disminución de la producción de las plantas será en la misma proporción, por lo que el decremento en la capacidad de procesamiento de las plantas representará 2,889 bpd (20% del promedio manejado de septiembre de 1998 a junio de 1999), ver figura no. 4-3. al disminuir la capacidad en el área de lubricantes, el residuo primario se procesará para producir combustibles, convirtiéndolo en gasóleo y residuo de vacío productos que poseen un menor valor agregado (ver figura no. 4-4).

Estas pérdidas diarias por disminución de la carga a las plantas de lubricantes (20% del flujo actual), menos la recuperación realizada en la planta de combustibles, arroja un total de \$64,050.20 U.S. dls. al día y considerando que la rehabilitación durará 260 días, la pérdida total ascenderá a \$16,653,052 U.S. dls. al año (ver tablas no's. 4-4, 4-5, y 4-6).

FIGURA No. 4-4: INCREMENTO EN LA PRODUCCIÓN DE COMBUSTIBLES, AL DISMINUIR LA CAPACIDAD DE PROCESAMIENTO DE LAS PLANTAS DE PROCESO.

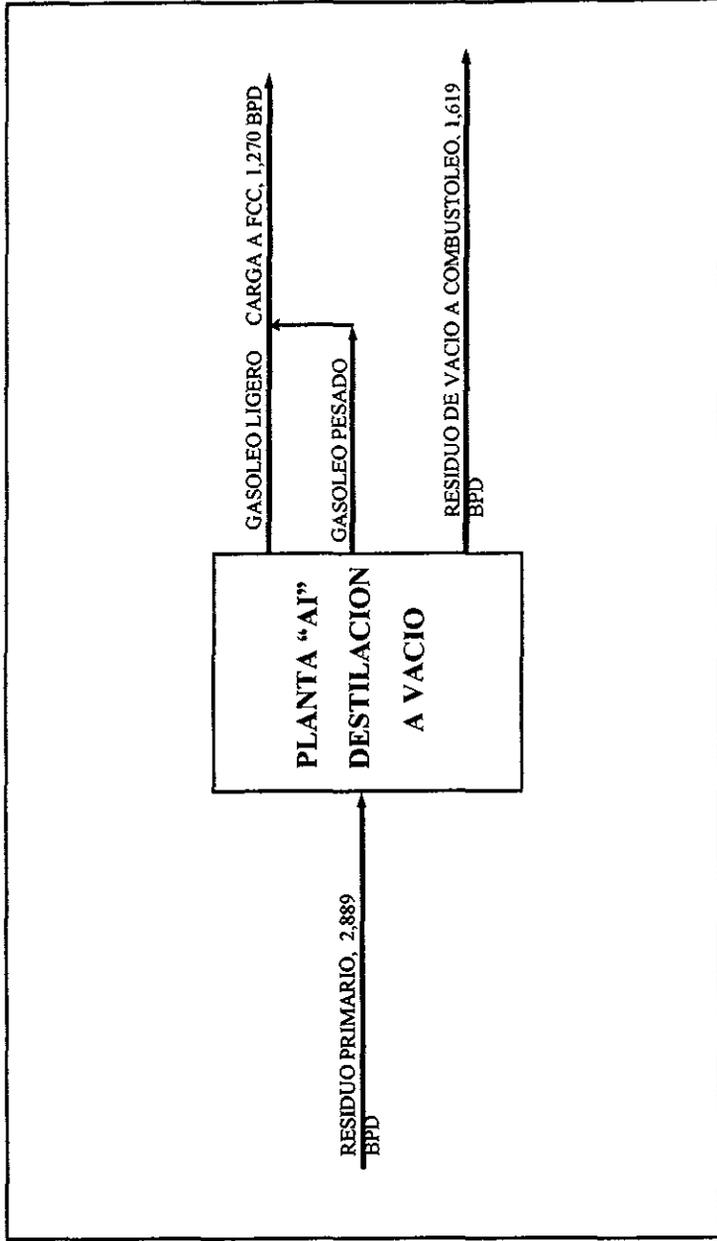


TABLA No. 4-4: COSTOS DEBIDOS A LA REDUCCIÓN EN LA PRODUCCIÓN DE ACEITES E INCREMENTO EN COMBUSTIBLES AL REDUCIR 20% LA CAPACIDAD DE PROCESAMIENTO DE LAS PLANTAS EN U.S. DLS. (CASO A).

PRODUCTO	UNIDADES	UNIDADES/D	\$/UNIDAD	\$/D
HUSOS B	BL	174	31.68	5,512.32
TECNOL B	BL	24	42.26	1,014.24
N.L. 95 B	BL	219	44.28	9,696.88
NEUTRO 90 B	BL	40	41.78	1,671.16
NEUTRO PES. 90 B	BL	340	45.92	15,612.80
PARAFINA °F	BL	5	70.21	351.05
PARAFINA °Q	BL	17	75.61	1,285.37
PARAFINA °S	BL	12	49.88	598.56
PARAFINA °A	BL	83	26.08	2,164.64
PARAFINA G1-95	BL	151	29.64	4,474.89
DIESEL PRIMARIO	BL	-6,876	22.29	-153,266.04
DIESEL SIN	BL	8,291	26.32	218,219.12
RESIDUO DE VACÍO	BL	-1,830	9.11	-16,671.30
GASOLINA U-13	BL	499	23.75	11,851.75
ASFALTO AC-20	BL	1,570	15.18	23,832.60
GASOLEO DE VACÍO	BL	-59	22.05	-1,300.95
AC CÍCLICO PESADO	BL	-448	15.87	-7,109.76
AEROFLEX N° 1	BL	18	29.89	538.02
AEROFLEX N° 2	BL	23	41.69	958.87
EXTRACTO	BL	210	24.24	5,090.40
AC. CÍCLICO LIG	BL	-925	20.72	-19,166.00
RESIDUO U-10	BL	1,151	10.92	12,568.92
PESADO 90 B	BL	115	53.57	6,160.55
CILINDROS 650 B	BL	38	51.93	1,973.34
PARAFINA °H	BL	16	61.62	985.92
PARAFINA °B	BL	31	24.88	771.28
HIDRÓGENO U-9	M3	-201,030	0.05	-10,051.50
GAS AMARGO	M3	64,321	0.06	3,859.26
GAS SECO	M3	26,932	0.07	1,885.24
PROPANO	BL	-22	17.52	-384.21
BUTANO	BL	-10	19.11	-181.84
FURFURAL	KG	-358	1.41	-504.99
M.E.K	LTS	-857	0.73	-625.39
TOLUENO	LTS	-574	0.22	-126.21
IMP-DSD-10	KG	-16	7.92	-130.02
IMP-DSD-14	KG	-15	8.93	-131.59
CRIT.1424	KG	-238	4.63	-1,102.28
CRIT.424	KG	-24	4.63	-112.50
SUBTOTAL A				120,212.59
DISMINUCIÓN DE COSTO SERVICIOS				-15,343.60
DECREMENTO NETO DE PRODUCCIÓN				104,868.98

TABLA No. 4-5: COSTOS Y BENEFICIOS AL INCREMENTAR LA CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN DE COMBUSTIBLES; RESIDUO PRIMARIO A COMBUSTIBLES (CASO B).

PRODUCTO	UNIDADES	UNIDADES/D	\$/UNIDAD	\$/D
GASOLEO DE VACÍO	BL	1,270	22.05	28,002.23
RESIDUO DE VACÍO	BL	1,619	9.11	14,741.80
SUBTOTAL				42,744.03
INCREMENTO EN COSTO DE SERVICIOS				-1,925.25
INCREMENTO DE PRODUCCIÓN COMBUSTIBLES				40,818.78

TABLA No. 4-6: CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS TOTALES EN (US \$) DEBIDAS A LA DISMINUCIÓN DEL 20 % EN LA CARGA PROMEDIO A LAS PLANTAS

	\$/D	\$ TOTAL
DECREMENTO NETO (CASO A - CASO B)		
DISMINUCIÓN TOTAL DE PRODUCCIÓN DIARIA	64,050.20	
DISMINUCIÓN TOTAL DE PRODUCCIÓN PARA 260 DÍAS (QUE DURARÁ LA REHABILITACIÓN DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO)		16,653,052

Dado lo anterior, y considerando que el costo de construcción de la torre nueva será de \$10,551,785 U.S. dls. (ver tabla no. 4-3), mientras que el costo de la rehabilitación de la torre existente, será de \$11,845,138 U.S. dls. (ver tabla no. 4-2) y tomando en cuenta que en la rehabilitación se tendrá una disminución en la producción del 20% (ver tabla 4-6), mientras que en la construcción de la torre nueva no se tendrá esta disminución de producción, debido a que durante el proceso de construcción de esta torre no interferirá con la operación de la torre de enfriamiento actual. Esto da un costo total de \$28,498,190 U.S. dls. para la rehabilitación de la torre 32e-1, mientras que para la construcción de la torre nueva se requiere una inversión de \$10,551,785 U.S. dls únicamente.

Otro parámetro importante que se debe tomar en cuenta, son los costos de operación para ambas torres, en este estudio se determino que la torre 32e-1 una vez rehabilitada requerirá un total de \$1,897,202.5 U.S. dls. al año, mientras que la torre nueva ct-2000, requerirá \$1,629,158.7 U.S. dls. al año (ver tablas no's. 4-7 y 4-8).

TABLA No. 4-7: COSTOS DE OPERACIÓN DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO EXISTENTE, UNA VEZ REHABILITADA.

CONCEPTO	UNIDADES/D	\$/D	\$/AÑO
1. MANO DE OBRA			
A) OPERACIÓN DIRECTA		0.0	0.0
B) SUPERVISIÓN INMEDIATA		0.0	0.0
2. CONSUMO DE AGUA (REPOSICIÓN)			
A) AGUA DE REUSO	362.9 M ³	36.57	13,348.78
B) AGUA DE POZO	155.5 M ³	72.54	26,477.83
3. CONSUMO DE REACTIVOS			
A) CLORO	20.0 KG	13.61	4,966.55
B) ÁCIDO SULFÚRICO	32.0 KG	1.58	576.33
C) INHIBIDORES		26.75	9,764.85
4. CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA			
A) ALUMBRADO	320.4 KW-H	11.85	4,327.00
B) VENTILADORES	8,056.8 KW-H	298.10	108,806.50
C) BOMBAS	29,439.60 KW-H	1089.26	397,581.80
TOTAL		1550.56	565,849.64

TABLA No. 4-8: COSTOS DE OPERACIÓN DE LA NUEVA TORRE DE ENFRIAMIENTO CT-2000.

CONCEPTO	UNIDADES/D	\$/D	\$/AÑO
1. MANO DE OBRA			
A) OPERACIÓN DIRECTA		0.0	0.0
B) SUPERVISIÓN INMEDIATA		0.0	0.0
2. CONSUMO DE AGUA			
A) AGUA DE REUSO	362.9 M ³	36.57	13,348.78
B) AGUA DE POZO	155.5 M ³	72.54	26,477.83
3. CONSUMO DE REACTIVOS			
A) CLORO	20.0 KG	13.61	4,966.55
B) ÁCIDO SULFÚRICO	32.0 KG	1.58	576.33
C) INHIBIDORES		26.75	9,764.85
4. CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA			
A) ALUMBRADO	236.4 KW-H	8.75	3,192.58
B) VENTILADORES	17,904 KW-H	662.45	241,793.52
C) BOMBAS	10,659.6 KW-H	394.40	143,957.90
TOTAL		1216.65	444,078.34

4.2.1 INTEGRACIÓN.

Una vez concluida la obra, ya sea la torre nueva o la rehabilitación de la torre existente, se procederá a la integración de cada uno de los circuitos de distribución de agua de enfriamiento para cada una de las plantas a las que dará servicio. Para este proceso de integración se estima que requerirá un tiempo de paro aproximado de 7 días para cada una de las plantas, en los cuales las cargas de alimentación a las plantas se enviarán a almacenamiento y se considera que es posible procesar esta carga una vez que la torre haya alcanzado su capacidad de diseño; para el procesamiento de esta carga, se realizará en forma gradual alimentando a las plantas el excedente en su capacidad de procesamiento actual respecto a la de diseño. Esta etapa se estimó que el mayor tiempo de reposición será de 12 días (ver tabla no. 4-9), con lo que el tiempo de integración afectará el flujo de efectivo del primer año en 84 días de operación (7 días por cada planta, de acuerdo a 12 plantas).

TABLA No. 4-9: TIEMPO DE REPOSICIÓN DE LAS PLANTAS DEBIDAS AL TIEMPO DE INTEGRACIÓN DE CADA UNA DE ESTAS Y CONSIDERANDO QUE UNA VEZ QUE LAS TORRE ENTRE EN OPERACIÓN LAS PLANTAS ALCANCEN SU CAPACIDAD DE DISEÑO.

PLANTA	CARGA	CARGA PRO-MEDIO (BPD)	INCREMENTO (BPD)	FACTOR DE REPOSICIÓN
U-1	RES. PRIM.	14446	2554	5.66
U-2	NEUT. PES.	2330	422	5.52
U-2	PESADO	1268	230	5.50
U-2	CILINDROS	343	62	5.53
U-2	ASFALTO	4122	747	5.52
U-3	HUSOS	1562	276	5.66
U-3	TECNOL	285	50	5.70
U-3	N. LIGERO	2236	395	5.66
U-3	NEUTRO	342	61	5.61
U-3	N.PESADO	3216	602	5.34
U-4	HUSOS 90	1087	192	5.66
U-4	TECNOL 90	156	28	5.57
U-4	N. LIGERO 95	1408	249	5.65
U-4	NEUTRO 90	254	45	5.64
U-4	N. PESADO 90	2344	439	5.34
U-5	HUSOS 90	1076	435	2.47
U-5	TECNOL 90	154	45	3.42
U-5	N. LIGERO 95	1394	246	5.67

U-5	NEUTRO 90	251	28	8.96
U-5	NEUTRO PESADO	2321	190	12.22
U-10	RESIDUO	8972	2540	3.53
U-10	AC. CIC. PES.	1196	339	3.53
U-10	EXTRACTO	1795	508	3.53
U-14	AC. CIC. LIG	4627	373	12.40
U-14 + U-7	DIESEL	30073	3808	7.90

De lo anteriormente expuesto, se aprecia claramente que la inversión inicial (sin considerar las pérdidas por producción) para la rehabilitación de la torre 32e-1, supera en un 12% a la inversión requerida para la construcción de la torre nueva ct-2000; mientras que los costos (pérdidas) por afectación de la producción de lubricantes durante la rehabilitación de la torre, se han estimado en \$16,653,052 U.S. dls., lo que da un monto superior a los 28 millones de dólares para la rehabilitación de la torre 32e-1, superando ampliamente el monto requerido para la construcción de la torre nueva; a demás de que los costos de operación de la torre 32e-1 superan en un 16.5% a los costos de operación de la torre nueva; esto debido a la torre existente cuenta con una mayor cantidad de equipos mecánicos. Por lo anterior desde este momento, se puede apreciar que no es recomendable la rehabilitación de la torre de enfriamiento, siendo lo más adecuado la construcción de una torre de enfriamiento nueva; la cual se construirá tomando en cuenta los requerimientos y distribución mas adecuada a las plantas actuales, dándole una mayor flexibilidad y confiabilidad a las instalaciones como se muestra en la figura 4-1.

4.3 BENEFICIOS ESPERADOS.

Como ya se ha venido indicando a lo largo del presente trabajo, que debido a que actualmente a las plantas de lubricantes no se les suministra el agua de enfriamiento suficiente y/o con la temperatura lo suficiente mente baja para absorber la carga térmica actual de cada una de las plantas; lo que ha repercutido en la capacidad de procesamiento de las mismas. Ya que muchos de los problemas de operación actuales de las plantas, están directamente asociados al suministro insuficiente de agua de enfriamiento.

De este modo, se tiene estimado que una vez que las plantas alcancen su capacidad de diseño; este excedente que se procesará, produzca los lubricantes suficientes (con un mayor valor agregado) que justifiquen y hagan rentable la rehabilitación o construcción de la torre de enfriamiento.

De esta forma el incremento de carga a procesar que se pretende lograr se indica en la figura no. 4- 5; mientras que los beneficios económicos esperados se indican en las tablas no's 4-10, 4-11 y 4-12.

FIGURA No. 4-6: DISMINUCIÓN EN LA PRODUCCIÓN DE COMBUSTIBLES AL ALCANZAR LAS PLANTAS DE LUBRICANTES SU CARGA DE DISEÑO.

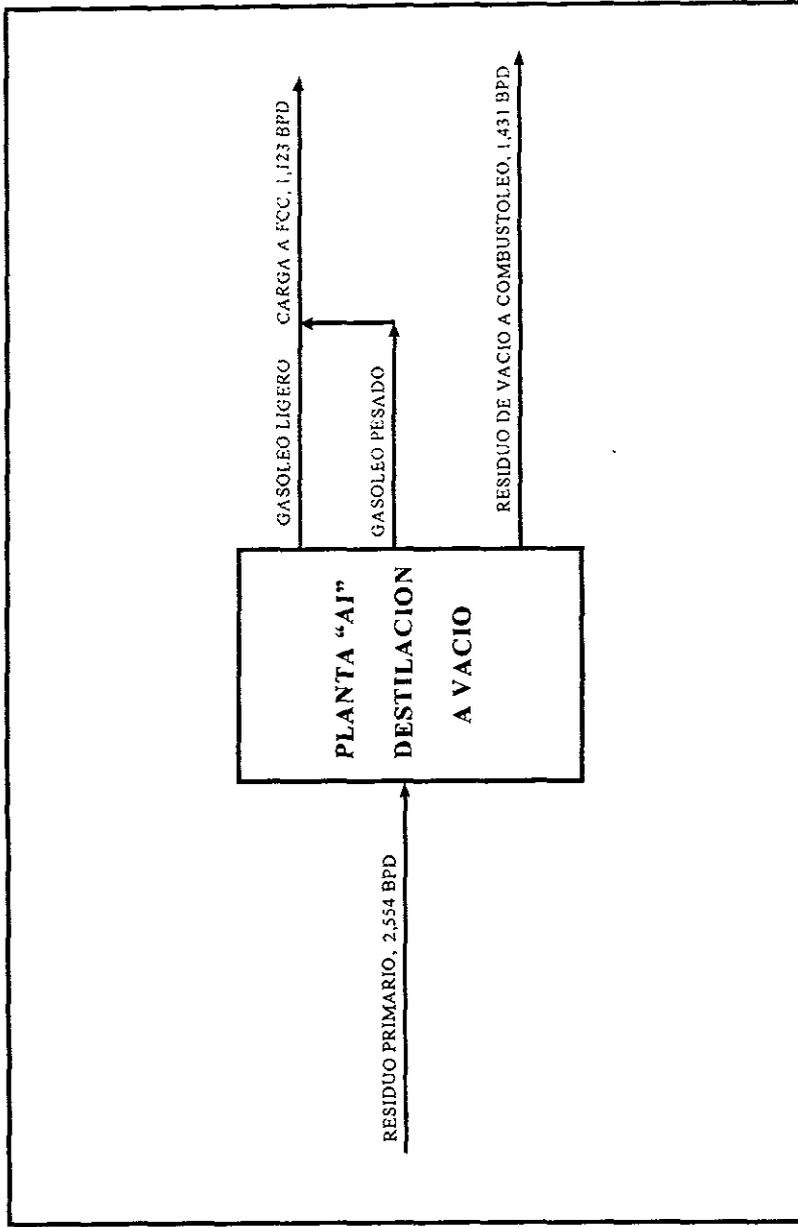


TABLA No. 4-10: INCREMENTO EN LA PRODUCCIÓN DE LAS PLANTAS DE LUBRICANTES.

PRODUCTO	UNIDADES	UNIDADES/D	USD/UNIDAD	USD/D
HUSOS B	BL	154	31.68	4,878.72
TECNOL B	BL	22	42.28	929.72
NEUTRO LIGERO 95 B	BL	194	44.28	8,590.32
NEUTRO 90 B	BL	35	41.78	1,462.30
NEUTRO PESADO 90 B	BL	259	45.92	11,893.28
PARAFINA °F	BL	5	70.21	351.05
PARAFINA °Q	BL	15	75.61	1,134.15
PARAFINA °S	BL	10	49.88	498.80
PARAFINA °A	BL	74	26.08	1,929.92
PARAFINA G1-95	BL	115	29.64	3,408.60
DIESEL SIN	BL	6100	26.32	160,552.00
GASOLINA U-13	BL	566	23.75	13,442.50
ASFALTO AC-20	BL	1381	15.18	20,963.58
GASOLEO DE VACÍO	BL	105	22.05	2,315.25
AROFLEX N° 1	BL	16	29.89	478.24
AROFLEX N° 2	BL	20	41.69	833.80
EXTRACTO	BL	0	24.24	0.00
RESIDUO U-10	BL	1597	10.92	17,439.24
PESADO 90 B	BL	102	53.57	5,464.14
CILINDROS 650 B	BL	34	51.93	1,765.62
PARAFINA °H	BL	14	61.62	862.68
PARAFINA °B	BL	28	24.88	696.64
GAS AMARGO	M3	84045	0.06	5,042.70
GAS SECO	M3	10856	0.07	759.92
SUBTOTAL				265,693.17

TABLA No. 4-11: INCREMENTO EN EL CONSUMO DE MATERIAS PRIMAS POR LAS PLANTAS DEL ÁREA DE LUBRICANTES.

PRODUCTO	UNIDADES	UNIDADES/D	USD/UNIDAD	USD/D
DIESEL AMARGO	BL	-4,927.0	22.29	-109,822.83
RESIDUO DE VACÍO	BL	-2,540.0	9.11	-23,139.40
AC. CÍCLICO PESADO	BL	-518.0	15.87	-8,220.66
AC. CÍCLICO LIG	BL	-373.0	20.72	-7,730.05
HIDRÓGENO U-9	M3	-202,902.0	0.05	-10,145.10
SUBTOTAL				-159,058.04

NOTA: Estos valores tienen signo negativo por ser consumos.

TABLA No.4-12: DISMINUCIÓN EN LA PRODUCCIÓN DE COMBUSTIBLES POR EL INCREMENTO EN LA PRODUCCIÓN DE LUBRICANTES.

PRODUCTO	UNIDADES	UNIDADES/D	USD/UNIDAD	USD/D
GASOLEO DE VACÍO	BL	-1,123.0	22.05	-24,762.15
RESIDUO DE VACÍO	BL	-1,431.0	9.11	-13,036.41
SUBTOTAL				-37,798.56

NOTA: Estos valores tienen signo negativo por ser consumos.

De esta forma, los ingresos adicionales por venta de productos

Total (LUBRICANTES - MATERIAS PRIMAS - COMBUSTIBLE): **68,836.57 U.S.D./DÍA**

TABLA No. 4-13: CONSUMO DE REACTIVOS, REFRIGERANTES Y CATALIZADORES ADICIONALES, POR EL INCREMENTO EN LA CARGA DE PROCESAMIENTO.

PRODUCTO	UNIDADES	UNIDADES/D	USD/UNIDAD	USD/D
PROPANO	BL	-18.83142	17.52	-329.93
BUTANO	BL	-8.41536	19.11	-160.82
FURFURAL	KG	-316.76616	1.41	-446.64
MEK	LTS	-694.03038	0.73	-506.64
TOLUENO	LTS	-420.47036	0.22	-92.50
IMP-DSD-10	KG	-2.641323	7.916	-20.91
IMP-DSD-14	KG	-21.884385	8.93	-195.43
CRIT.1424	KG	-330.40185	4.631	-1,530.09
CRIT.424	KG	-9.79125	4.631	-45.34
SUBTOTAL				-3,328.30

NOTA: Estos valores tienen signo negativo por ser consumos.

Del mismo modo al incrementar las cargas a procesar en cada una de las plantas, también se tendrán incrementos en los consumos de servicios de cada una de estas plantas, de este modo el costo de los servicios auxiliares se nos incrementaran tal y como se indica en la tabla no. 4-14.

TABLA No. 4-14: VARIACIÓN DE LOS COSTOS DE LOS SERVICIOS, AL CAMBIAR LAS CARGAS A LAS PLANTAS DE LUBRICANTES.

PLANTAS	CARGA ADICIONAL	GAS COMB. (M ³)	COPE ⁽²⁾ (BLS)	T ⁽¹⁾	Kw-h	GAS USD/DIA 0,0686 usd/m3	COPE USD/DIA 12,759 usd/bj	VAPOR USD/DIA 9usd/ton	EE USD/USD/K 0,036usd/k v/h	TOTAL USD/DIA
U-14 (HDD)	1865	1,916.42	0.00	7.57	1,458.36	133.38	0.00	68.10	52.50	
U-1	2554	440.54	23.45	55.35	2,006.90	30.66	299.26	498.14	72.25	
U-2	1461	218.68	12.83	339.92	687.52	15.22	163.67	3,059.24	25.11	
U-3	1364	1,525.08	24.39	24.87	4,196.76	106.15	311.22	223.87	151.08	
U-4	953	816.99	7.37	17.91	2,395.45	56.86	93.98	161.23	86.24	
U-5	944	3,920.60	18.94	171.40	8,187.79	272.87	241.61	1,542.63	294.76	
U-6	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
U-7	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
U-8	3435	7,679.72	0.00	13.70	5,140.27	534.51	0.00	123.32	185.05	
U-9	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
U-10	3387	26,752.92	43.41	182.86	23,019.03	1,862.00	553.90	1,645.74	828.69	
U-11	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
U-12	566	828.92	0.00	12.92	1,827.95	57.69	0.00	116.32	65.81	
U-13	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
U-31	292	429.85	4.17	32.65	656.77	29.92	53.20	293.81	23.64	
LF	178	1,398.71	7.32	64.33	663.44	97.35	93.39	578.96	23.88	
LG										
DISM. EN EL 20%		45,928.43	141.88	923.49	50,250.23	3,196.62	1,810.23	8,311.37	1,809.01	15,127.23
AI	2554	7,580.90	11.25	75.85	9,671.07	527.63	143.60	682.62	348.16	
INCREMENTO A CARGA NOMINAL		7,580.90	11.25	75.85	9,671.07	527.63	143.60	682.62	348.16	1,702.01
TOTAL (INCREMENTO EN LA CARGA - DISMINUCIÓN DEL 20% EN LA CARGA)										-13,425.22

NOTA: Estos valores tienen signo negativo por ser consumos.

(1) - T= Consumo de vapor requerido para procesar la carga adicional.

(2) - COPE= Consumo de combustible pesado para procesar la carga adicional.

En la tabla no. 4-14 se muestra el incremento en el costo diario de servicios auxiliares en las plantas de proceso de lubricantes, del que se ha restado el decremento de consumo por el mismo concepto en la planta de destilación de vacío que dejaría de procesar esa materia prima.

Así mismo, en la tabla no 4-15 se resume los beneficios diarios netos que se obtienen al incrementar a los valores nominales las cargas de las plantas localizadas en el área Bechtel. Y como se indicó anteriormente, para efectos de estimar los beneficios anuales netos se considera que anuales las plantas operan 330 días. De esta forma, el beneficio neto al incrementar la carga de las plantas es de 17,187,406 usd

TABLA NO. 4-15: BENEFICIO NETO ADICIONAL AL INCREMENTAR LA PRODUCCIÓN DE LAS PLANTAS A SU CAPACIDAD DE DISEÑO.

	USD/D
1 INGRESOS ADICIONALES POR VENTA DE PRODUCTOS	68,836.57
2 CONSUMO DE REACTIVOS, REFRIGERANTES Y CATALIZADORES EN AREA BECHTEL	-3,328.30
3 INCREMENTO DEL COSTO DE LOS SERVICIOS AL INCREMENTAR CARGAS	-13,425.22
BENEFICIO DIARIO TOTAL (USD)	52,083.05
BENEFICIO ANUAL EN USD, BASE 330 DIAS/AÑO	17,187,405.51

NOTA: Estos valores tienen signo negativo por ser consumos.

CAPÍTULO 5: EVALUACIÓN FINANCIERA.

5.0 EVALUACIÓN FINANCIERA.

5.1 CONSIDERACIONES.

En el proceso para determinar la rentabilidad de los proyectos de rehabilitación de la torre de enfriamiento, o de construcción de la torre de enfriamiento nueva, se tomaron en cuenta varias consideraciones, las cuales se describen a continuación, donde se expone en forma resumida las observaciones desarrolladas en el capítulo 4.

5.1.1 **COSTO DEL PROYECTO:** Adicionalmente a los costos estimados de las obras, se consideró un 10 % adicional de gastos de administración y el 1% de gastos de estudios previos; valores recomendados y que normalmente son utilizados en este tipo de estudios. de forma tal que el costo total de la obra nos queda de la siguiente manera:

	REHABILITACION 32E-1 (U.S.DLLS.)	TORRE NUEVA CT- 2000 (U.S. DLLS.)
COSTO DE LA OBRA	\$11,845,138.00	\$10,554,955.00
COSTOS DE ADMINISTRACIÓN	\$1,184,414.00	\$1,055,495.00
COSTO DE ESTUDIOS PREVIOS	\$118,451.00	\$105,549.00
COSTO TOTAL	\$13,148,000.00	\$11,716,000.00

5.1.2 **PROGRAMA DE CONSTRUCCIÓN:** El presente trabajo, esta enfocado a dos casos generales; el primero es en el que se considera la construcción de una torre de enfriamiento nueva, la cual como ya se menciona no afectará la producción actual de las plantas salvo durante la integración de las plantas a los cabezales de esta torre, pero esta afectación también se tendrá en la integración de la torre rehabilitada, por lo que en la comparación de las alternativas no se esta tomando en cuenta este efecto.

5.1.3 **DISMINUCIÓN DE LA PRODUCCIÓN:** Para la determinación del efecto por la disminución en el suministro de agua de enfriamiento, se consideraron los promedios manejados por las plantas desde septiembre de 1998 a junio de 1999, de este promedio, se determinó que la disminución del flujo de residuo primario que se dejará de procesar en las plantas lubricanteras asciende a 2,889 bpd, 20% del flujo procesado actualmente (ver figuras 1 del anexo 1 y anexo 2), el cual será enviado a la planta preparadora de

carga A-I, en la que será procesado para producir combustibles (gasóleo y residuo de vacío).

5.1.4 IMPACTO EN LOS INGRESOS: El 20% de decremento en el procesamiento del residuo de vacío en las plantas lubricanteras y su envío a la planta A-I, para producir combustibles, ocasiona que se tengan pérdidas económicas debido al menor valor agregado de los combustibles respecto a los lubricantes; para la determinación de estas pérdidas, se realizó el balance de las plantas y de esta forma poder determinar las cantidades que se están dejando de producir (ver figura 4-2), con estos datos y de acuerdo con los precios de estos productos, se determinó que las pérdidas que se tendrían por dejar de procesar este flujo, ascienden a \$104,868.98 U.S. dls. al día (ver tabla no. 4-2), pero como este residuo primario se enviara a la planta A-I, para producirán combustibles, en los que se tendrá una recuperación de \$40,818.78 U.S. dls. (ver tabla no. 4-3), de lo anterior, se determinó que las pérdidas diarias al dejar de procesar los 2,889 bpd en las plantas lubricanteras, ascienden a \$64,050.2 U.S. dls. al día; y como se indico anteriormente, el tiempo de rehabilitación durará 260 días, esto se traduce en una pérdida total de \$16,653,052 U.S. dls. (ver tabla no. 4-4). los cuales fueron considerados como parte de la inversión requerida para la rehabilitación de la torre, que sumado a la inversión requerida para la rehabilitación, da un total de \$29,801,000.00 U.S. dls, como costo total para la rehabilitación de la torre.

Mientras que el caso de la construcción de una torre nueva, no se afectará la producción actual de las plantas, y solo se requerirá que paren las plantas durante la integración de las mismas, al igual que en el caso de la rehabilitación de la torre existente.

5.1.5 FACTOR DE REPOSICIÓN: Una vez que la torre de enfriamiento haya sido rehabilitada o construida, es necesario tomar en cuenta la integración a esta torre, de cada una de las diferentes plantas que conforman el área bechtel; se ha estimado que esta integración tomara un máximo de 7 días por cada planta, pero como la refinería tiene la capacidad para almacenar estas cargas que se dejarán de procesar, estas se enviarán a almacenamiento, puesto que una vez que las plantas hayan sido integradas, se espera que se tenga un incremento en la capacidad de procesamiento, debido al mejoramiento

en la capacidad de enfriamiento de estas, este incremento se ha estimado que podría ascender en 2,554 bpd, que representa aproximadamente un incremento del 18% de la carga actual. Se espera que una vez que las plantas alcancen su capacidad nominal, esta carga almacenada, sea procesada en forma adicional a la carga actual. En la tabla no 4-9, se estima que el máximo tiempo de reposición será de 12 días por cada día de paro, lo que representa un tiempo de recuperación de 84 días, que son los mismos en que se verá afectada la rentabilidad del proyecto en el primer año de operación de la torre. Pero como los costos de la integración de las plantas una vez que la torre haya sido rehabilitada o construida es el mismo en ambos casos, por lo que su efecto en la rentabilidad del proyecto será el mismo para ambas torres.

5.1.6 **COSTOS DE OPERACIÓN:** Los costos de operación considerados para la operación de las torres, considerando los nuevos requerimientos de estas una vez que hallan sido rehabilitadas, son los siguientes:

	REHABILITACIÓN 32E-1 (U.S. DLLS.)	TORRE NUEVA CT-2000 (U.S. DLLS.)
I.- COSTOS VARIABLES TOTALES DE PRODUCCIÓN	\$442,327.87	\$564,099.75
II.- COSTOS DE OPERACIÓN (3% ISBL + 1% OSBL)	\$289,518.86	\$257,752.00
III.- GASTOS FIJOS	\$385,586.48	\$343,278.80
COSTO TOTAL EN EFECTIVO DE PRODUCCIÓN	\$1,289,205.09	\$1,043,358.67
I.- CARGOS DEL CAPITAL	\$657,997.40	\$585,800.00
COSTO TOTAL DE PRODUCCIÓN	\$1,897,202.49	\$1,629,158.67

Debido a la dificultad que representa el estimado de los costos de operación de cualquier obra, se utilizaron los criterios recomendados y comúnmente utilizados para la estimación de estos; quedando de la siguiente forma:

- I. Costos variables totales de producción: este costo incluye los incrementos en servicios auxiliares (energía eléctrica), materia prima (agua de reposición de pozos y

de rehuso), sustancias químicas (cloro y ácido sulfúrico), como se indica en las tablas no. 's 4-7 y 4-8.

II Costos de operación: en este concepto se incluyen los incrementos en los costos de administración, costos de operación, costos por supervisión técnica y costos por mantenimiento:

- En lo que respecta a los costos de administración, costos de operación y costos por supervisión técnica, se consideró que no se tiene incremento en los montos de estos conceptos en relación con los desembolsos que se realizan actualmente en la operación de la torre existente, de esta forma los costos de estos conceptos no representarán incremento alguno al costo actual, por lo que este gasto se considero como cero.
- Costos por mantenimiento: en la determinación de este gasto, el criterio recomendado es considerar el 3% del costo de la obra dentro de límite de batería (ISLB) mas un 1% de los costos de la obra de integración (ASBL).

	CONSTRUCCIÓN TORRE CT-2000 (U.S. DLLS.)	REHABILITACIÓN DE LA TORRE 32E-1 (U.S. DLLS.)
INVERSIÓN TOTAL	\$11,716,000.00	\$13,159,948.00
ISBL (60% DE LA INVERSIÓN)	\$7,029,600.00	\$7,895,597
OSBL (40% DE LA INVERSIÓN)	\$4,686,400.00	\$5,263,979
COSTO TOTAL DE MANTENIMIENTO (3% DEL ISBL MAS EL 1% DEL OSBL)	\$257,752.00	\$289,519.00

III Gastos fijos: estos gastos están constituidos por los gastos generales de la planta, gastos fijos directos y los seguros e impuestos sobre la propiedad.

- Gastos generales de la planta: estos gastos generalmente constituyen el 65% de la suma de los gastos de supervisión técnica, mano de obra y mantenimiento; pero como se indico en el punto II, no se tienen costos de supervisión puesto que los gastos de mano de obra y mantenimiento ascienden a \$257,752.00 y \$289,519.00 U.S. dlls., lo que arroja unos gastos generales de la planta de:

	TORRE NUEVA (U.S. DLLS.)	REHABILITACIÓN TORRE 32E-1 (U.S. DLLS.)
GASTOS DE MANTENIMIENTO	257,752.00	289,519.00
GASTOS GENERALES DE LA PLANTA.	167,538.8	188,187.35

- Gastos fijos directos: estos gastos generalmente representan el 45% de la suma de los gastos de mano de obra más los de supervisión técnica. Pero como ya se indico en el anteriormente en este proyecto no se tienen incrementos en los gastos de mano de obra ni de supervisión técnica.
- Seguros e impuestos sobre la propiedad: como criterio recomendado, normalmente se considera que estos gastos representan el 1.5% del la inversión; de esta forma, los gastos por este concepto a:

	CONSTRUCCIÓN TORRE CT-2000 (U.S. DLLS.)	REHABILITACIÓN DE LA TORRE 32E-1 (U.S. DLLS.)
INVERSIÓN	\$11,716,000.00	\$13,159,948.00
GASTOS DE SEGUROS E IMPUESTOS SOBRE LA PROPIEDAD (1.5% DE LA INVERSIÓN)	\$175,740.00	\$197,399.00

IV) Cargos de capital: este gasto esta representado por la depreciación del equipo, y de acuerdo a lo indicado en la tabla 3-2, para este caso se consideró un horizonte de planeación de 20 años, lo que resulta:

	CONSTRUCCIÓN TORRE CT-2000 (U.S. DLLS.)	REHABILITACIÓN DE LA TORRE 32E-1 (U.S. DLLS.)
INVERSIÓN	11,716,000.00	13,159,948.00
CARGOS DE CAPITAL (L.R. 20 AÑOS)	585,800.00	657,997.40

5.1.7 BENEFICIOS DEL PROYECTO: El beneficio que se tendrá al construir o rehabilitar la torre de enfriamiento es un incremento en la capacidad de procesamiento de las plantas, estimándose que éstas al tener una mayor capacidad de enfriamiento, podrán alcanzar su capacidad nominal; puesto que actualmente las plantas están procesando 14,446 bpd, de residuo primario, mientras que cuando las plantas reciban el agua de

enfriamiento suficiente, se considero que esta podrá alcanzar su capacidad de diseño, con lo que se manejarán 17,000 bpd (2,554 bpd de incremento, ver figura 4-5), lo que representa un incremento del 17.6% respecto a la capacidad de procesamiento actual. Este incremento de la capacidad de las plantas representa un beneficio anual (adicional) de \$17,187,405.5 U.S. dls.

En la determinación de estas utilidades se tomaron en cuenta el incremento de producción de las plantas de lubricantes (ver figura 4-5 y tabla 4-10), la disminución en la producción de combustibles en la planta de destilación al alto vacío A-I (ver figura no. 4-6), el incremento en el consumo de materias primas del área de lubricantes (ver tabla 4-11), incremento en el consumo de reactivos, refrigerantes y catalizadores por parte de las plantas (ver la tabla 4-13) y el incremento en el consumo de servicios auxiliares así como el decremento en el consumo de servicios en la planta de destilación al vacío (ver tabla 4-14).

- 5.1.8 **VALOR PRESENTE NETO:** Una vez determinados los costos de inversión y los beneficios que se obtendrán al construir o en su defecto rehabilitar la torre de enfriamiento, se determinaron los parámetros significativos y necesarios para evaluar la rentabilidad del proyecto: Valor presente neto, tasa interna de retorno, tiempo de recuperación de la inversión, etc.

TORRE NUEVA CT-2500

INICIO DEL PROYECTO	1-MAR-00
PERIODO DE CONSTRUCCIÓN	24 MESES
INICIO DE OPERACIONES	1-MAR-02
HORIZONTE DEL PROYECTO	20 AÑOS
TASA DE INTERÉS ANUAL	10.00%

CAPITAL DE TRABAJO U.S.\$	\$0
INVERSIÓN TOTAL U.S.\$	\$11,716,000
VALOR PRESENTE NETO U.S.\$	\$99,193,425
VALOR PRESENTE DE LA INVERSIÓN U.S.\$	\$10,545,767
INDICE DE RENTABILIDAD (VPN / VPI)	9.41
TASA INTERNA DE RETORNO	70.84%
PERIODO DE RECUPERACIÓN DE LA INVERSIÓN	0 AÑOS, 11 MESES

REHABILITACIÓN DE LA TORRE 32E-1

CAPITAL DE TRABAJO U.S.\$	\$0
INVERSIÓN TOTAL U.S.\$	\$29,813,000
VALOR PRESENTE NETO U.S.\$	\$81,536,969
VALOR PRESENTE DE LA INVERSIÓN U.S.\$	\$26,835,176
INDICE DE RENTABILIDAD (VPN / VPI)	3.04
TASA INTERNA DE RETORNO	36.43%
PERIODO DE RECUPERACIÓN DE LA INVERSIÓN	2 AÑOS, 1 MES

FLUJO DE EFECTIVO. En la determinación del flujo de efectivo se consideró un periodo de proyección de 20 años a partir del arranque de la torre. El flujo de efectivo es el ingreso neto anual esperado en un periodo de 20 años a partir del arranque de la planta = INGRESO POR VENTA DE PRODUCTOS - COSTO TOTAL EN EFECTIVO DE PRODUCCIÓN.

5.2 FLUJO DE EFECTIVO

	TORRE NUEVA CT-200	REHABILITACIÓN TORRE 32E-1
INGRESOS POR VENTA DE PRODUCTOS (U.S. DLLS.)	17,187,402.39	17,187,402.39
COSTO TOTAL DE PRODUCCIÓN (U.S. DLLS.)	1,043,358.67	1,239,205.09
FLUJO DE EFECTIVO (U.S. DLLS.)	16,144,043.72	15,948,197.30

5.3. PREMISAS DE LA EVALUACIÓN FINANCIERA.

- a) Horizonte de planeación 20 años.
- b) Tasa de descuento 10%.
- c) Se considera un valor de rescate de cero.
- d) Valores presentes netos al 1° de febrero del 2000.
- e) Fecha de inicio del proyecto, marzo del 2002.
- f) Tiempo de construcción 720 días.

- g) La inversión requerida se calculó de acuerdo a los costos de propuestas técnicas de fabricantes de torres de enfriamiento.
- h) La inversión del sistema de control distribuido, se consultaron propuestas técnicas de fabricante.
- i) No se consideró capital de trabajo
- j) Los flujos de efectivo del proyecto ocurren al final de cada período.

CAPÍTULO 6: ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.

6.0 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.

En todo proyecto hay un elemento de incertidumbre asociado a las alternativas estudiadas. Ya que no solo son problemáticos los estimativos de las condiciones económicas futuras, si no que además los efectos económicos futuros de la mayoría de los proyectos solamente son conocidos con un grado de seguridad relativo. Es esta falta de certeza sobre el futuro, lo que hace a la toma de decisiones económicas una de las tareas más difíciles que deben realizar las industrias.

Además, es un hecho que para la toma de decisiones rara vez se consideren los resultados de un solo análisis. Puesto que generalmente lo que interesa es un rango *completo de los posibles resultados que pueden ocurrir* como una consecuencia de las variaciones en las estimaciones iniciales de los parámetros del proyecto. Por consiguiente, un estudio económico completo debe incluir la sensibilidad de los criterios económicos o cambios en las estimaciones utilizadas.

Generalmente la sensibilidad de una propuesta debe hacerse con respecto al parámetro más incierto. Por ejemplo es posible que en la evaluación de una propuesta se tenga incertidumbre respecto a los costos que se van a incurrir o con respecto a la vida de la propuesta; en estos casos es posible determinar una curva que muestre la sensibilidad de la TIR o el VPN a cambios en los costos incurridos, o cambios en la vida de la propuesta.

Es importante señalar que la sensibilidad de un proyecto debe hacerse con respecto al parámetro más incierto, es decir o se determina la sensibilidad de la TIR o el VPN del proyecto a cambios en el precio unitario de venta o a cambios en los costos, o a cambios en la vida o a cambios en el nivel de demanda.

Por tal razón y con el propósito de determinar que tan flexible es este proyecto, se determinaron los efectos que se tendrían en los siguientes casos: Aumento de la inversión en un 20%, aumento del plazo de construcción en un 20%, aumento en la inversión estimada y una disminución en los beneficios obtenidos.

Después de haber estimado los parámetros de comportamiento de este proyecto, se demostró que este es muy rentable, e inclusive en un momento dado se pueden reducir los ingresos estimados por venta de productos hasta en un 81%, o en su defecto incrementar la inversión inicial hasta en un 500%, y aun así el proyecto seguiría siendo rentable, con una tasa interna de retomo mínima del 15%.

Del mismo modo y con el propósito de mostrar la sensibilidad y rentabilidad del proyecto, en las figuras 6-1, 6-2, 6-3 y 6-4 se muestra la tendencia de la sensibilidad de este proyecto.

SENSIBILIDAD DEL PROYECTO

	TIR (%) ESTIMADO	TIR CON 20% DE AUMENTO EN LA INVERSIÓN	TIR CON 20% DE AUMENTO EN EL PLAZO	INCREMENTO EN INVERSIÓN		REDUCCIÓN EN LOS BENEFICIOS	
				% DE INCREMENTO	TIR (%)	% DE REDUCCIÓN.	TIR (%)
TORRE NUEVA, CT-2000	70.84	62.44	31.44	500	15	81	15
REHABILITACIÓN, TORRE 32E-1	36.43	65.63	34.31	320	15	60	15

FIGURA 6.1: SENSIBILIDAD DEL PROYECTO AL VARIAR LOS INGRESOS POR VENTA DE LOS PRODUCTOS (INGRESOS vs TIR), EN EL CASO DE LA TORRE NUEVA.

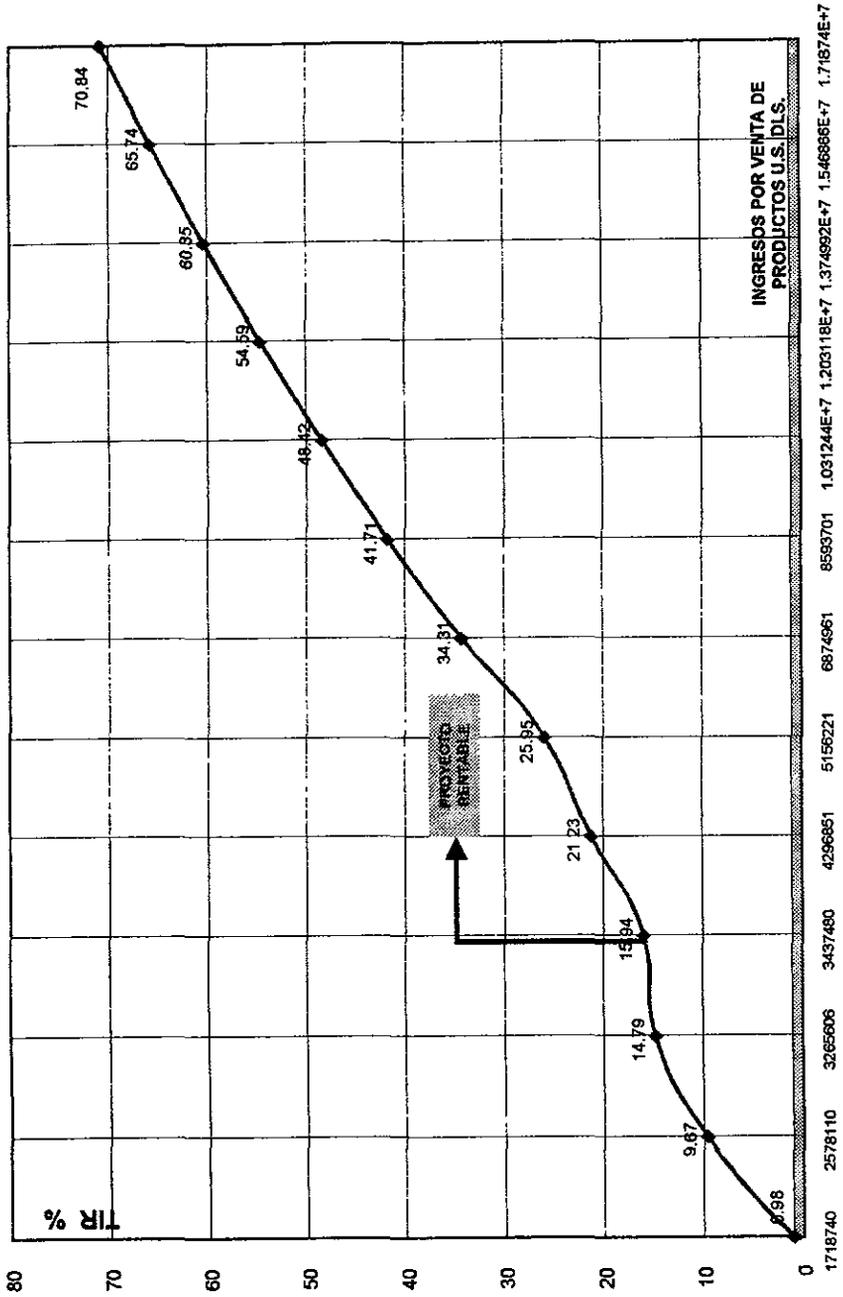


FIGURA 6.2: SENSIBILIDAD DEL PROYECTO AL VARIAR LA INVERSIÓN (INVERSIÓN vs TIR), EN EL CASO DE LA TORRE NUEVA.

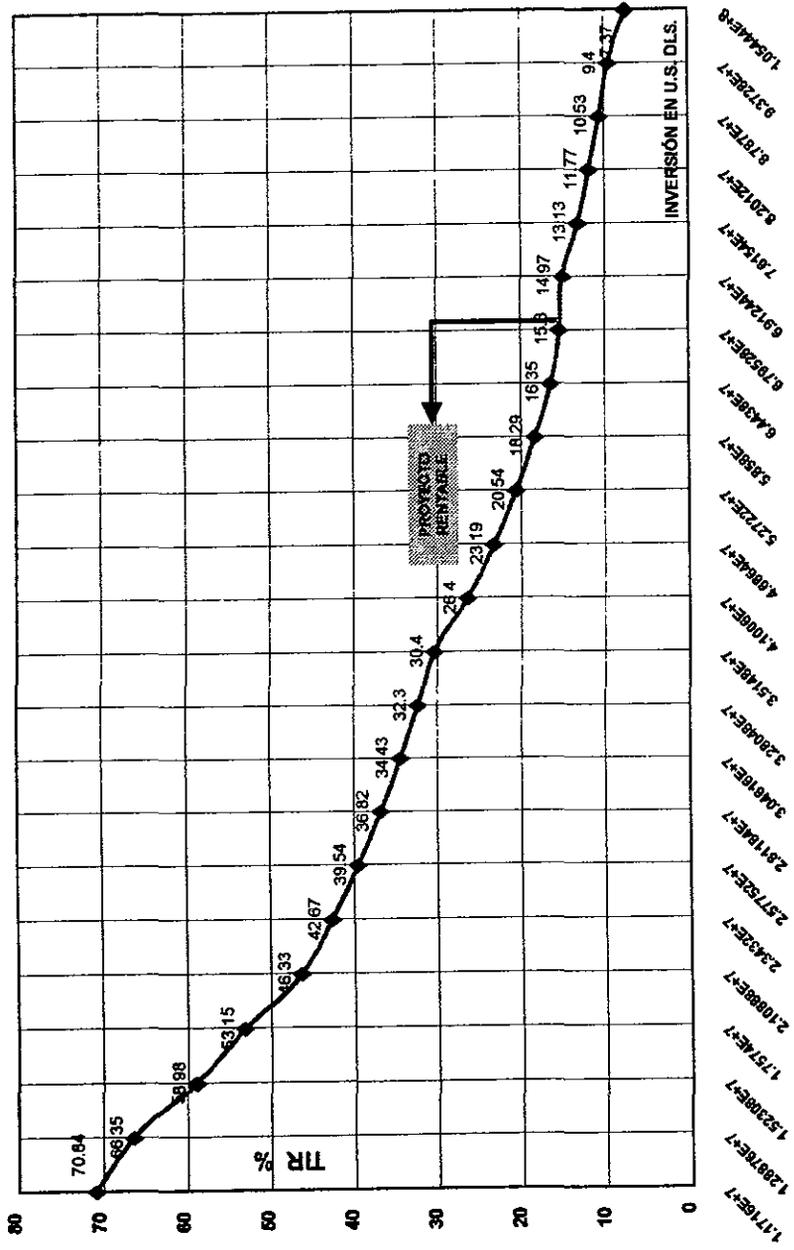


FIGURA 6.3: SENSIBILIDAD DEL PROYECTO AL VARIAR LA INVERSIÓN (INVERSIÓN vs TIR), EN EL CASO DE LA REHABILITACIÓN DE LA TORRE EXISTENTE.

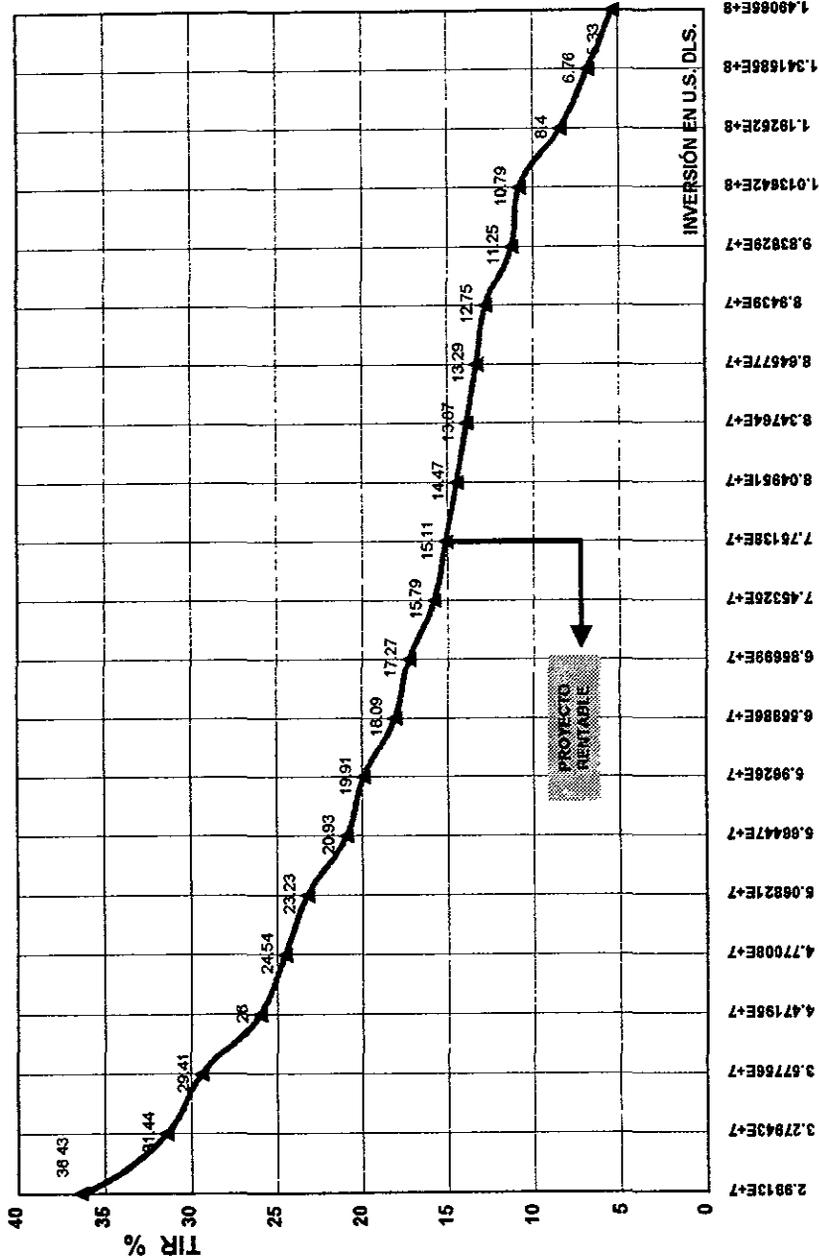
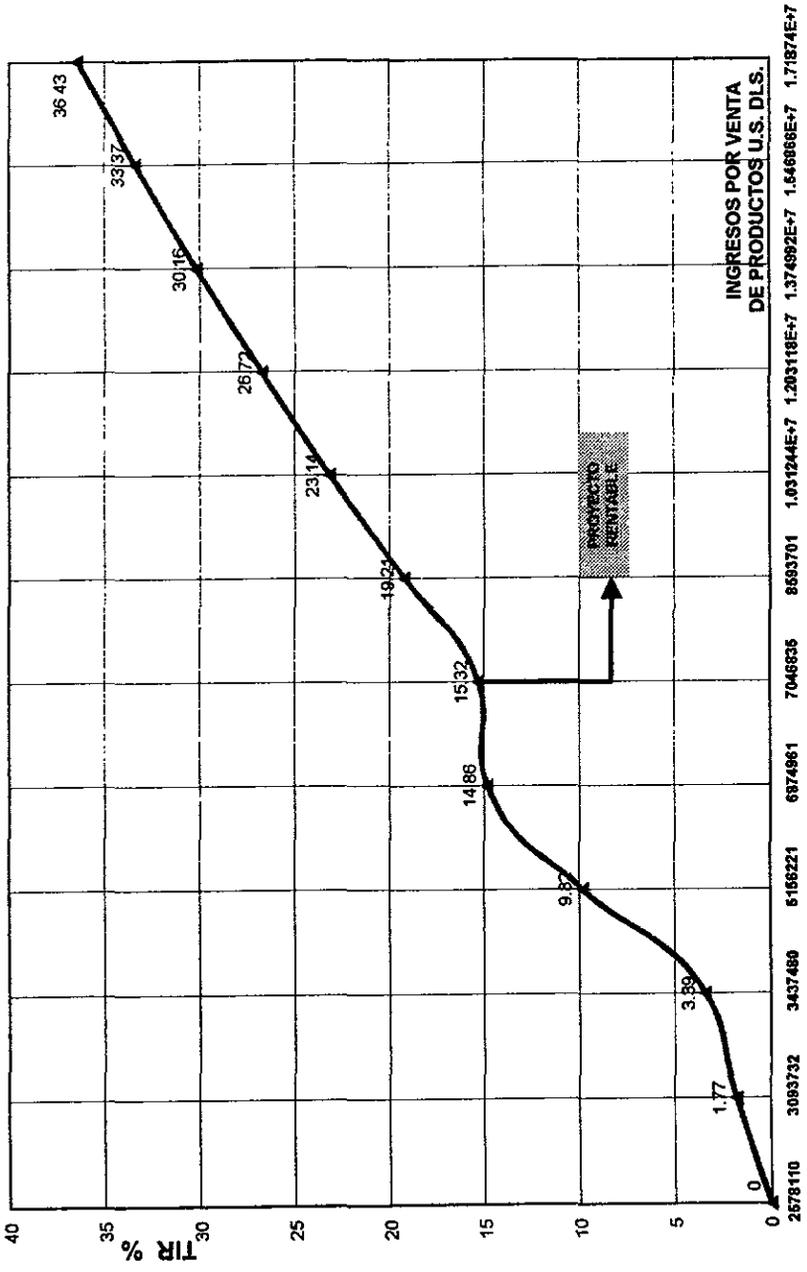


FIGURA 6.4: SENSIBILIDAD DEL PROYECTO AL VARIAR LOS INGRESOS POR VENTA DE PRODUCTOS (INGRESOS vs TIR), EN EL CASO DE LA REHABILITACIÓN DE LA TORRE EXISTENTE.



CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES.

7.0 CONCLUSIONES.

Con lo desarrollado en los diferentes aspectos técnicos de este estudio de factibilidad, consideramos que se han agotado los recursos para analizar la conveniencia del proyecto de construir una nueva torre de enfriamiento que dé servicio a las plantas de proceso localizadas en el área bechtel de la refinería ING. ANTONIO M. AMOR de Salamanca, Gto.

Se ha visto que las plantas de proceso que están siendo afectadas en su capacidad de producción por las deficiencias del sistema de enfriamiento, tienen muy alta rentabilidad debido al alto valor agregado que tienen sus productos y por este motivo no conviene afectar su operación con los trastornos que ocasionaría la rehabilitación de la torre de enfriamiento mientras las plantas permanecen en operación. De aquí la primera conclusión es que resulta más conveniente técnica y económicamente construir una nueva torre de enfriamiento que rehabilitar la torre de enfriamiento actual.

Según la estadística de operación del área bechtel durante el año anterior, se observa que en las plantas de proceso del área en estudio se ha tenido una deficiencia de carga para proceso del 18 %, esto tiene un costo estimado en 17.2 millones de dólares por año, que es necesario recuperar.

El contar con un adecuado sistema de agua de enfriamiento, es una condición necesaria pero no suficiente para que las plantas de proceso puedan operar a sus condiciones de diseño y no podemos esperar que todos los problemas se resuelvan con solo mejorar el sistema de enfriamiento, pero si se tiene la seguridad que este es una de las principales limitaciones y de mayor costo de solución. Por este motivo se estudió hasta donde se podía incrementar la inversión en nuevos proyectos para solucionar estas limitaciones y se determinó que aún es posible invertir mas de cuatro veces este valor de 12 mm de U.S. dls. y mantener la rentabilidad del proyecto.

Por otra parte si no se invirtiera en otras medidas para recuperar totalmente la capacidad de las plantas, se ha visto en este estudio que con solo recuperar el 19 % de la capacidad perdida en las plantas se justificaría el proyecto. no queremos con esta conclusión dar a entender que no se deben superar las demás deficiencias que afectan

las plantas de ese sector, es necesario y recomendamos que se atiendan, tomando las medidas pertinentes para:

- Mejorar el tratamiento de agua de repuesto.
- Vigilar la operación y mantenimiento de la torre de enfriamiento.
- Vigilar la distribución de agua de circulación en las plantas.
- Vigilar el tratamiento interno del agua de circulación.
- Monitorear el comportamiento de los enfriadores principales en cada planta de proceso.

Del mismo modo, el análisis de sensibilidad demuestra que la rentabilidad del proyecto soporta grandes cambios en costos, disminución de los ingresos o cambios en el tiempo de ejecución de la obra, manteniéndose la rentabilidad del proyecto.

Con lo antes expuesto se ha demostrado lo útil y conveniente que resulta realizar los estudios económicos para poder discernir entre las opciones para la solución de un proyecto así mismo al demostrarse cual de las dos alternativas es la más conveniente, se ha cubierto ampliamente el objetivo del presente trabajo ya que se ha demostrado que aun que las dos opciones son rentables, lo más conveniente y adecuado es la construcción de una torre de enfriamiento nueva en lugar de la rehabilitación de la ya existente.

CAPÍTULO 8: BIBLIOGRAFÍA.

8.- BIBLIOGRAFÍA.

- 1.- CTI-Code ATC-105; CTI Code Tower Standard Specification; Acceptance Test Code for Water-Cooling Towers; rev 1990.
- 2.- CTI Bulletin PFM-116; Recommended Recirculation Allowances; Report on the Studio of "Recirculation"; abril de 1959
- 3 - Donald. Q. Kern, Procesos de Transferencia de Calor, ED. CECSA, México, 1985.
- 4.- EPRI (Electric Power Research Institute);Cooling Tower Performance Prediction and Improvement; vol I
- 5.- E. Paul Degarmo y John R. Canada; Ingeniería Económica; Compañía Editorial Continental, S.A.; 1982, Cuarta Impresión.
- 6 - Estadísticas de Costos y Producción de las Plantas de Lubricantes (1998 -1999).
- 7 - Foust, Principios de Operaciones Unitarias; Editonal I, México, 1981.
- 8.- George A. Taylor; Ingeniería Económica (Toma de Decisiones Económicas); Primera Edición, 1970; Editorial Limusa-Wiley S.A.
- 9 - H. C. Van Ness, Introducción a la Termodinámica en Ingeniería Química, Editorial Mc. Graw-Hill, México, 1981.
- 10.- James L. Willa, Evolution of the Water Cooling Tower, Cooling Towers Institute 1991 Annual Meeting, Technical Paper number TP91-01.
- 11.- James L. Willa; Improving Cooling Towers, Chemical Engineering; noviembre 1997.
- 12.- Raúl Coss Bu; Análisis y Evaluación de Proyectos de Inversión; Editorial Limusa; Segunda Edición 1986.
- 13.- R. Byron Bird, Fenómenos de Transporte, ED. Reverte, España 1980.
- 14.- Robert Burger, Colder Cooling Water Pays off, Chemical Engineering, March 1991.
- 15.- Robert. H. Perry, Manual del Ingeniero Químico, ED. Mc Graw-Hill, México, 1993.
- 16.- The Marley Cooling Tower Company, Cooling Tower Fundamentals, 2ª ed., 1985.
- 17.- W. V. L. Campagne y L J McDonough; How Cooling Towers Affect Process Energy Savings; Hydrocarbon Processing, Junio 1984.