

**EVALUACIÓN TÉRMICA DE LAS TORRES
DE ENFRIAMIENTO DE LA REFINERÍA
EL PALITO - PDVSA**



**UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCIÓN DE POSTGRADO
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE PROCESOS**



EVALUACIÓN TÉRMICA DE LAS TORRES DE ENFRIAMIENTO DE LA REFINERÍA EL PALITO - PDVSA

AUTOR: Ing. Jesús E. González M.

TUTOR: Msc. María F. Modroño A.

Valencia, Noviembre de 2013



**UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCIÓN DE POSTGRADO
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE PROCESOS**



EVALUACIÓN TÉRMICA DE LAS TORRES DE ENFRIAMIENTO DE LA REFINERÍA EL PALITO - PDVSA

AUTOR: Ing. Jesús E. González M.

Trabajo especial de grado presentado ante la
Dirección de Post Grado de la Universidad de
Carabobo para optar al Título de Magíster en
Ingeniería de Procesos

Valencia, Noviembre de 2013



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCIÓN DE POSTGRADO
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE PROCESOS



VEREDICTO

Nosotros, miembros del jurado designado para la evaluación del trabajo de grado titulado: **EVALUACIÓN TÉRMICA DE LAS TORRES DE ENFRIAMIENTO DE LA REFINERÍA EL PALITO - PDVSA**, presentado por: **Jesús Eduardo González Mogollón** para optar al Título de Magíster en Ingeniería de procesos, estimamos que el mismo reúne los requisitos para ser considerado como Aprobado.

Irina León
C.I.:
Presidente del jurado

Carlos Hernández
C.I.:
Jurado

Carlos Pérez
C.I.:
Jurado

Valencia, Noviembre de 2013

ÍNDICE GENERAL

	pp.
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I. EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	
1.1 Planteamiento del problema	3
1.2 Formulación de problema	8
1.3 Objetivos de la investigación	9
1.3.1 Objetivo general	9
1.3.2 Objetivos específicos	9
1.4 Justificación	9
1.5 Limitaciones	11
1.6 Alcance	11
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	
2.1 Antecedentes	12
2.2 Bases teóricas	14
2.2.1 Principios de las torres de en enfriamiento	14
2.2.2 Teoría de las torres de enfriamiento	16
2.2.3 Torres de tiro mecánico	22
2.2.4 Torres de tiro natural	29
CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO	
3.1 Tipo de estudio y de investigación	33
3.2 Diseño de la investigación	33
3.2.1 Validación de los datos de diseño	36
3.2.2 Condiciones para la medición en campo	44
3.2.3 Método de curvas de comportamiento	46

CAPÍTULO IV. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 Diagnóstico térmico de las torres de enfriamiento de la R.E.P.	61
4.1.1 Preparación del procedimiento	61
4.1.2 Mediciones obtenidas en las torres de enfriamiento	62
4.2 Determinación de la capacidad de enfriamiento de cada una de las torres de la R.E.P.	66
4.2.1 Selección del procedimiento de evaluación	66
4.2.2 Validación de los datos de diseño	69
4.2.3 Determinación de la capacidad actual de enfriamiento de cada torre	72
4.3 Análisis de las deficiencias operacionales que afecten la capacidad térmica de las torres de enfriamiento	78
4.3.1 Desviaciones encontradas en la torre E-951	88
4.3.2 Desviaciones encontradas en la torre M-7154	89
4.3.3 Desviaciones encontradas en la torre M-7156	90
4.4 Generación de alternativas que conlleven a incrementar la capacidad térmica y vida útil de las torres de enfriamiento	91
4.4.1 Alternativas para la torre E-951	91
4.4.2 Alternativas para la torre M-7154	91
4.4.3 Alternativas para la torre M-7156	92
4.5 Desarrollo de las alternativas seleccionadas con el fin de mejorar la capacidad de enfriamiento de las torres	94
4.5.1 Sustitución del relleno en las torres M-7154 y M-7156	94
4.5.2 Creación de un programa de mantenimiento para las torres de enfriamiento E-951, M-7154 y M-7156.	95
4.6 Presentación un estimado de costo clase V, con la finalidad de respaldar la toma de decisiones en la implantación de las alternativas generadas	97

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	103
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	106
APÉNDICES	109
APÉNDICE A: CÁLCULOS TÍPICOS	110
APÉNDICE B: PARÁMETROS MEDIDOS EN CAMPO	117
APÉNDICE C: CARTA PSICOMÉTRICA	125
APÉNDICE D: GRÁFICAS (Curvas de comportamiento de las torres)	126
APÉNDICE E: TABLAS Y GRÁFICAS RESULTANTES	130
APÉNDICE F: COTIZACIONES	134

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA	pp.
2.1 Condiciones para la recirculación de agua en las torres de enfriamiento	22
3.1 Procedimiento para la evaluación térmica	34
3.2 Instrumentos de medición requeridas para la evaluación	44
3.3 Modelo de lista de comprobación de inspección	57
4.2 Resultados obtenidos en la torre de enfriamiento E-951	63
4.3 Resultados obtenidos en la torre de enfriamiento M-7154	64
4.4 Resultados obtenidos en la torre de enfriamiento M-7156	65
4.5 Calor retirado en las diferentes torres de enfriamiento de la R.E.P.	70
4.6 Porcentaje de desviación del calor retirado en las torres de enfriamiento	70
4.7 Porcentaje de desviación del calor retirado actual en las torres de enfriamiento	71
4.8 Área de entrada de aire en las torres de enfriamiento	72
4.9 Número de estaciones de cada torre de enfriamiento	73
4.10 Temperaturas predichas mediante las curvas de comportamiento	73
4.11 Temperaturas de agua fría para la torre E-951 según la capacidad	74
4.12 Resultados obtenidos como producto del proceso iterativo para determinar las propiedades del aire en la torre E-951	76
4.13 Resultados requeridos para determinar la capacidad de las torres de enfriamiento	77
4.14 Resultados promedio de análisis físico-químico del agua de enfriamiento de las tres torres	87
4.15 Características de barra para reemplazar en las torres M-7154 y M-7156	94
4.16 Programa de mantenimiento para las torres de enfriamiento E-951, M-7154 y M-7156	96
4.17 Estimación del número total de barras a reemplazar en las torres de enfriamiento M-7154 y M-7156	97
4.18 Costo total por barras requeridas para la sustitución del relleno en las torres de enfriamiento M-7154 y M-7156	98

ÍNDICE DE TABLAS (continuación)

TABLA		pp.
4.19	Costo de mantenimiento preventivo y correctivo en torres de enfriamiento	99
4.20	Costos asociados al mantenimiento preventivo y correctivo en las torres de enfriamiento E-951, M-7154 y M-7156	100
4.21	Estimación del costo total instalado para las nuevas torres de enfriamiento E-951, M-7154 y M-7156	101
4.22	Diferencia de costos para las torres de enfriamiento E-951, M-7154 y M-7156	102
B.1	Parámetros a medir en la entrada de la torre de enfriamiento E-951	117
B.2	Flujo de agua fría en la salida en la torre de enfriamiento E-951	117
B.3	Temperaturas del fluido en la salida de la torre de enfriamiento E-951	117
B.4	Presiones del fluido en la salida de la torre de enfriamiento E-951	118
B.5	Flujo del fluido en la entrada de la torre de enfriamiento E-951	118
B.6	Temperaturas del fluido en la entrada de la torre de enfriamiento E-951	118
B.7	Corriente eléctrica de los ventiladores en la torre de enfriamiento E-951	118
B.8	Potencia de los ventiladores de la torre de enfriamiento E-951	119
B.9	Parámetros a medir en la entrada de las torres de enfriamiento de la torre de enfriamiento M-7154	119
B.10	Velocidades del fluido en la salida de la torre de enfriamiento M-7154	119
B.11	Temperaturas del fluido en la salida de la torre de enfriamiento M-7154	120
B.12	Presiones del fluido en la salida de la torre de enfriamiento M-7154	120
B.13	Velocidades del fluido en la entrada de la torre de enfriamiento M-7154	120
B.14	Temperaturas del fluido en la entrada de la torre de enfriamiento M-7154	120
B.15	Corriente eléctrica de los ventiladores en la torre de enfriamiento M-7154	121

ÍNDICE DE TABLAS (continuación)

TABLA		pp.
B.16	Voltaje de los ventiladores de la torre de enfriamiento M-7154	121
B.17	Potencia de los ventiladores en la torre de enfriamiento M-7154	121
B.18	Parámetros a medir en la entrada de la torre de enfriamiento M-7156	122
B.19	Velocidades del fluido en la salida en la torre de enfriamiento M-7156	122
B.20	Temperaturas del fluido en la salida de la torre de enfriamiento M-7156	122
B.22	Velocidades del fluido en la entrada de la torre de enfriamiento M-7156	122
B.23	Temperaturas del fluido en la entrada de la torre de enfriamiento M-7156	122
B.24	Corriente eléctrica de los ventiladores en la torre de enfriamiento M-7156	123
B.25	Voltaje de los ventiladores en la torre de enfriamiento M-7156	124
B.26	Potencia de los ventiladores en la torre de enfriamiento M-7156	124
E.1	Temperaturas predichas mediante las curvas de comportamiento para la torre M-7154	130
E.2	Temperaturas de agua fría para la Torre M-7154 según la capacidad	130
E.3	Temperaturas predichas mediante las curvas de comportamiento para la torre M-7156	132
E.4	Temperaturas de agua fría para la Torre M-7156 según la capacidad	133

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA		pp.
1.1	Fragmento del plot plan general de la R.E.P.	5
1.2	Sistema de enfriamiento simplificado asociado a la torre E-951	6
1.3	Sistema de enfriamiento simplificado asociado a la torre M-7154	7
1.4	Sistema de enfriamiento simplificado asociado a la torre M-7156	8
2.1	Balance calórico de un proceso de enfriamiento	18
2.2	Nomograma de las características de una torre de enfriamiento	20
2.3	Nomograma de características del rendimiento	21
2.4	Torre de tiro forzado	23
2.5	Torre de contraflujo	24
2.6	Torre de flujo transversal	25
2.7	Gráfica para determinar las dimensiones de una torre de enfriamiento de tiro inducido o en contracorriente	26
2.8	Gráfica de caballos de potencia para una torre de enfriamiento de tiro inducido o en contracorriente	27
2.9	Curva de rendimiento de una torre de enfriamiento usual	28
2.10	Torre de tiro hiperbólico	29
2.11	Gráfica universal de rendimiento para torres de enfriamiento de tiro natural	32
3.1	Sistema de enfriamiento	36
3.2	Medidor de flujo HFM	41
3.3	Medidor de temperatura FLUKE 66	43
3.4	Anemómetro digital Extech	43
3.5	Curva de comportamiento para una capacidad del 90% (3225L/s)	47
3.6	Curva de comportamiento para una capacidad del 100% (3583L/s)	48
3.7	Curva de comportamiento para una capacidad del 110% (3942L/s)	48
3.8	Temperaturas predichas en función del rango de enfriamiento	49
3.9	Temperaturas del agua fría en función del caudal de agua	50
4.1	Curva de comportamiento de la torre E-951 al 110% de su capacidad	67

ÍNDICE DE FIGURAS (continuación)

FIGURA	pp.
4.2 Curva de comportamiento de la torre M-7154 al 110% de su capacidad	68
4.3 Curva de comportamiento de la torre M-7156 al 110% de su capacidad	68
4.4 Volúmenes de control seleccionados en el sistema de enfriamiento	69
4.5 Temperaturas predichas en función del rango de enfriamiento de la torre E-951	74
4.6 Temperaturas de agua fría en función del caudal de la torre E-951	75
4.7 Diagrama de Ishikawa concerniente a la baja capacidad térmica de las torres de enfriamiento de la R.E.P.	81
4.8 Diagrama simplificado de Ishikawa concerniente a la baja capacidad térmica	83
4.9 Modelo de barra Gull Wing	95
C.1 Carta Psicométrica	125
D.1 Curva de comportamiento de la torre E-951 al 100% de su capacidad	126
D.2 Curva de comportamiento de la torre E-951 al 90% de su capacidad	127
D.3 Curva de comportamiento de la torre M-7154 al 100% de su capacidad	127
D.4 Curva de comportamiento de la torre M-7154 al 90% de su capacidad	128
D.5 Curva de comportamiento de la torre M-7156 al 100% de su capacidad	128
D.6 Curva de comportamiento de la torre M-7156 al 90% de su capacidad	129
E.1 Temperaturas predichas en función del rango de enfriamiento de la torre M-7154	131
E.2 Temperaturas de agua fría en función del caudal de la torre M-7154	131
E.3 Temperaturas predichas en función del rango de enfriamiento de la torre M-7156	132
E.4 Temperaturas de agua fría en función del caudal de la torre M-7156	133

RESUMEN

EVALUACIÓN TÉRMICA DE LAS TORRES DE ENFRIAMIENTO DE LA REFINERÍA EL PALITO-PDVSA

AUTOR: ING. JESÚS E. GONZÁLEZ M.

TUTOR: MSC. MARÍA F. MODROÑO A.

FECHA: Noviembre; 2013

La presente investigación se realizó con el propósito de evaluar térmicamente las torres de enfriamiento E-951, M-7154 y M-7156 con la finalidad de incrementar la capacidad de enfriamiento. Para lograr esto se inició un diagnóstico térmico mediante la preparación de un procedimiento antes de ingresar a campo y realizar las mediciones, basado en el código (ATC-105). Luego se determinó la capacidad de enfriamiento de cada torre mediante el método de “Curvas de comportamiento”. Posteriormente se validaron los datos de diseño mediante balances de energía. Se analizaron las deficiencias operacionales que pudieran afectar la capacidad térmica de las torres mediante un diagrama de Ishikawa. Se realizó una inspección visual de las estructuras de cada torre con la finalidad de dilucidar las verdaderas causas que estarían afectando la capacidad térmica. Finalmente se generaron las alternativas que conllevarán a incrementar la capacidad de enfriamiento. De acuerdo con las alternativas generadas, se seleccionó el reemplazo del relleno en las torres M-7154 y M-7156, ya que es el componente más influyente en la capacidad de enfriamiento seguidamente de la implementación de una plan de mantenimiento como parte del mejoramiento de la capacidad térmica en las tres torres de enfriamiento. Se recomienda implantar tanto un plan de mantenimiento riguroso como un plan de seguimiento diario de análisis físico-químico a las tres torres de enfriamiento, con lo que mantendremos la vida útil de las torres disminuyendo los costos de reparación o pérdidas por bajo rendimiento retrasando la inversión prematura de equipos nuevos.

Palabras clave: Torre de enfriamiento, evaluación térmica, sistema de enfriamiento, Código ATC-105.

SUMMARY

THERMAL EVALUATION OF COOLING TOWERS OF THE REFINERÍA EL PALITO - PDVSA

AUTHOR: ING. JESÚS E. GONZÁLEZ M.

TUTOR: MSC. MARÍA F. MODROÑO A.

DATE: November, 2013

This research was conducted to evaluate the cooling towers E-951, M-7154 and M-7156 with the purpose of increasing the cooling capacity. To achieve this, we began by performing a thermal diagnosis through the preparation of a procedure for measurements, based on the code (ATC-105). Then it was determined the cooling capacity of each tower through the method of "behavior curves". Subsequently the design data was validated through energy balances. Then, we analyzed the operational deficiencies that may affect the thermal capacity of the towers through an Ishikawa Diagram. To continue a visual inspection was carried out of the structures of each tower with the purpose of clarifying the true causes that would affect the thermal capacity. Finally we generated alternatives that lead to increase cooling capacity. In accordance with the alternatives generated, we selected the packing replacement in the towers M-7154 and M-7156, as the most influential component in cooling capacity, then we deployed a maintenance plan as part of improving the cooling capacity in the three cooling towers. It is recommended that you deploy both a rigorous maintenance plan as a part of daily monitoring of physical-chemical analysis of the three towers of cooling, with this, we will maintain the useful life of the towers, reducing costs of repair or losses due to low performance by delaying the premature investment of new equipment.

Key Words: cooling tower, thermal evaluation, cooling system, ATC Code-105.

INTRODUCCIÓN

El objetivo general de esta investigación está centrado en la evaluación térmica de las torres de enfriamiento E-951, M-7154 y M-7156 de la Refinería el Palito con la finalidad de generar las diferentes alternativas que conlleven a incrementar la capacidad de enfriamiento en las tres torres.

Para el logro de este objetivo se aplicó la siguiente metodología: se realizó un diagnóstico térmico basado en el código Cooling Technology Institute. (2000). Acceptance Test Code for Water-Cooling Tower. (CTI Code ATC-105). Luego se realizó una recolección de datos en campo, las cuales se realizaron cercano a las 12:00 m. Se determinó la capacidad de enfriamiento de cada torre mediante el método de “Curvas de comportamiento” ya que fueron suministradas por el fabricante las condiciones de operación al 90 %, 100 % y 110 % del flujo de agua de circulación de acuerdo con el código (CTI Code ATC-105), para lo cual se validaron los datos de diseño mediante balances de energía.

Luego de conocer la baja capacidad térmica en cada una de las torres fue necesario identificar y analizar las causas potenciales que proporcionan este bajo rendimiento, mediante un diagrama de Ishikawa. Seguidamente se realizó una inspección visual de las estructuras de cada torre con la finalidad de dilucidar las verdaderas causas que estarían afectando la capacidad térmica mediante el diseño de un instrumento. Luego de obtener dichas causas que están afectando la capacidad térmica se generaron alternativas que conllevarán a incrementar la capacidad de enfriamiento.

De acuerdo con las alternativas generadas, se seleccionó primeramente el reemplazo del relleno en las torres de enfriamiento M-7154 y M-7156 y la segunda alternativa seleccionada fue la implementación de un plan de

mantenimiento en las torres E-951, M-7154 y M-7156. Para las alternativas seleccionadas se soportó mediante un estimado de costo clase V, con la finalidad de respaldar la toma de decisiones en la implantación de dichas alternativas. Finalmente se calculó la diferencia de costos para las torres de enfriamiento mediante la diferencia de costos entre la inversión asociada al mantenimiento preventivo y correctivo y la inversión asociada al costo total instalado, esta diferencia representará la optimización de los recursos financieros, enfocándolos al mantenimiento preventivo y correctivo.

El presente trabajo consta de cuatro capítulos de los cuales el primero presenta la descripción del problema, la problemática planteada, así como los objetivos generales y específicos. También se dan las razones que justifican la investigación, limitaciones y el alcance. En el capítulo II se incluyen los antecedentes del trabajo desarrollado y aspectos de interés teórico referencial requeridos para el desarrollo del tema. Para el capítulo III se presentan pasos, técnicas y herramientas usados para el cumplimiento de los objetivos propuestos. En el capítulo IV se analizan y discuten los resultados obtenidos en cada uno de los objetivos planteados. Finalmente, se presentan las conclusiones y recomendaciones más relevantes.

Esta evaluación térmica tiene gran relevancia a nivel social, debido a que P.D.V.S.A. se verá favorecida al implantar las alternativas generadas incrementando el intercambio térmico en las torres de enfriamiento y por ende disminuyendo los costos asociados al consumo de agua y de energía.

Desde el punto de vista metodológico se espera que la puesta en práctica de estas propuestas suministren los soportes metodológicos a nuevos y futuros trabajos de investigación, enriqueciendo la producción de conocimientos intelectual proporcionando a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

En este capítulo presenta la descripción del problema que motiva la realización de este trabajo de investigación, la problemática planteada, así como los objetivos generales y específicos que se desean alcanzar en el mismo. De igual forma se darán a conocer las razones que justifican la investigación, las limitaciones y el alcance.

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Con el transcurso de los años el agua ha sido el principal componente para los sistemas de enfriamiento de refinerías, plantas químicas y petroquímicas. Según Lugo y col., (2003) expresan que su empleo para tales fines se agrava como consecuencia de la escases de este vital líquido en algunas partes del mundo, lo cual obliga a concentrar el uso con fines agrícolas, domésticos e industriales, obligando a instalar centrales térmicas cercanas a las zonas costeras. De acuerdo a lo expresado por estos autores se plantea un sistema de enfriamiento por aire, en el cual esta tecnología se ha venido desarrollando e implementando en lo últimos años.

Asimismo, Schultz, (2008) destaca que es importante comprender todos los puntos del uso de agua en una instalación. Por ejemplo, se puede encontrar que no todas las necesidades de agua requieren el mismo nivel de calidad. Algunas de las necesidades requieren una mediana calidad del agua como por ejemplo el agua contra incendio, mientras que para algunos usos requieren una alta calidad de agua cuando se adiciona al sistema de enfriamiento de una torre y es reemplazada por perdida de fugas de agua que se evaporan o exponen al aire.

Gougol y col., (2009) destacan que las torres de enfriamiento ubicadas cerca de las zonas costeras, tienen la tendencia de usar el agua de mar en lugar de agua de río con fines de enfriamiento.

Por lo tanto, las torres de enfriamiento se han convertido en una solución al problema al retirar calor en los procesos industriales, ésta es simplemente un intercambiador de calor en el cual un fluido caliente (agua) entrega parte de su energía a otro fluido (aire), reduciendo considerablemente la temperatura del agua, para ello solo es necesario reponer la masa de agua evaporada y el tratamiento de la misma con el fin de evitar formación de incrustaciones y crecimiento de algas.

En Venezuela, los procesos de enfriamiento del agua utilizada se pueden retirar del sistema o enfriarla nuevamente para su reutilización conformando un circuito de recirculación como ocurre en las torres de enfriamiento (E-951, M-7154 y M-7156) ubicadas en las zonas 7150, 7100 y 6800 respectivamente de la Refinería el Palito (R.E.P.) obteniendo mayor cantidad de agua y control sobre la contaminación de los ríos, como se muestra en la Figura 1.1.

Como se puede observar, la evaluación térmica de las torres de enfriamiento realizada en la R.E.P., ubicada en Punta Chávez, en la zona norte costera de Venezuela y a diez (10) kilómetros de Puerto Cabello estado Carabobo, ocupa una amplia extensión costera entre los ríos Sanchón y Aguas Calientes. Su ubicación estratégica posee la conexión con los mercados internacionales a través del terminal marino y con mercado interno a través de las plantas de llenado de El Palito, Yagua y Barquisimeto. En este sentido, se constituyó el principal productor y suplidor de combustibles y lubricantes del parque industrial y de la población de los estados centrales, así como una porción del occidente del país. Además, junto al Centro Refinador Paraguaná

y la Refinería de Puerto la Cruz se integra el Sistema Nacional de Refinación de PDVSA (Petróleos de Venezuela, Sociedad Anónima).

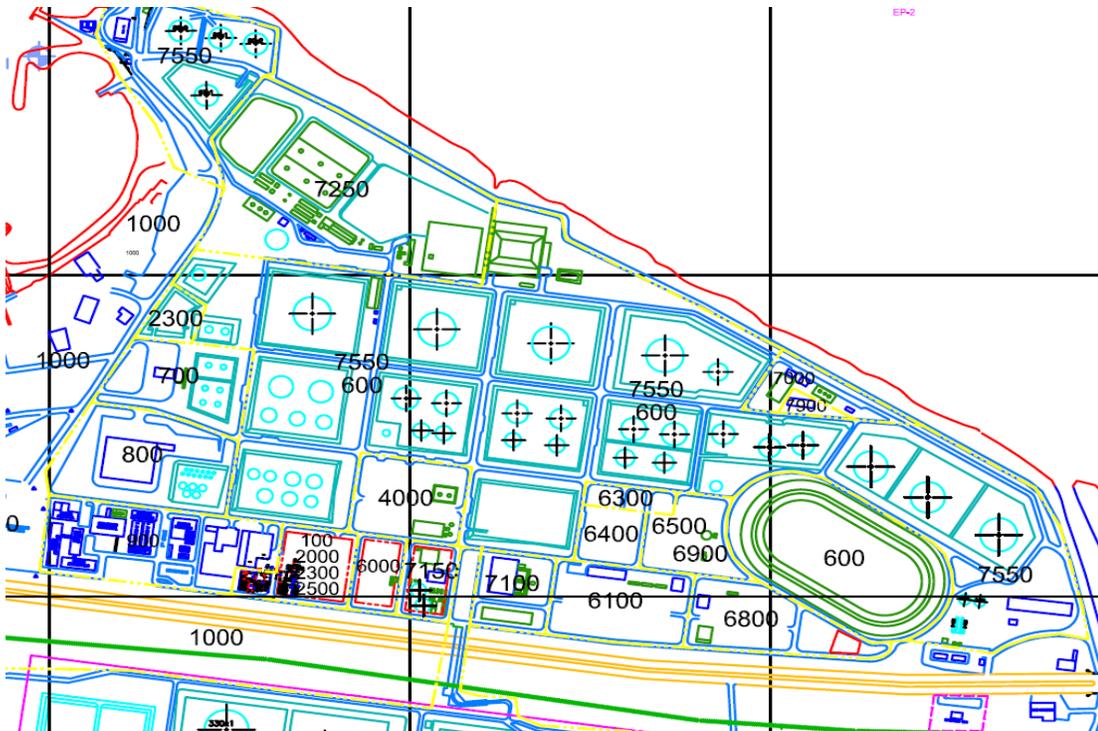


Figura.1.1 Fragmento del plot plan general de la R.E.P.
Fuente: P.D.V.S.A., 2008

El sistema de enfriamiento de la R.E.P. está constituido por tres (03) torres que operan independientemente reseñadas como sigue. La torre de enfriamiento E-951 fue instalada por Móbil Oil Company de Venezuela con un diseño de flujo cruzado, es decir que el aire circula mediante ventiladores de corriente de aire inducida en contra corriente con respecto al agua que cae, su finalidad es satisfacer los requerimientos de retiro de calor de la Unidad de Crudo y parte de Solventes, la torre está diseñada para manejar un flujo de 11.000 GPM de capacidad y posee un relleno interno constituido

por madera químicamente tratada, tiene la capacidad de enfriar el agua de 117 °F hasta 87 °F mediante un circuito cerrado (ver Figura 1.2), para posteriormente almacenarse en la piscina de agua fría donde posteriormente es succionada esta agua hacia las unidades antes mencionadas mediante las bombas G-955/56/57.

La torre de enfriamiento M-7154 diseñada por la empresa INDEIN con el mismo diseño que la torre E-951 y este sistema de enfriamiento disminuye la temperatura de agua recirculada de las Unidades de Conversión y tratamiento con excepción de la Unidad de Alquilación, la cual tiene su sistema de enfriamiento mediante la torre M-7156. También sirve de enfriamiento a las Unidades de Vacío, BTX, PTR, HDT y Planta Eléctrica, (ver Figura 1.3). La torre está diseñada para manejar un flujo de 75.000 GPM, y enfriar el agua desde 105 °F hasta 87 °F, en contracorriente con aire.

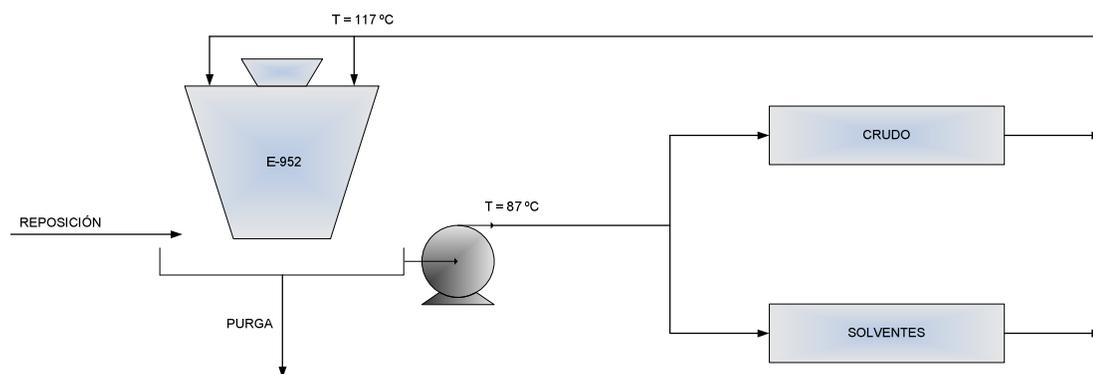


Figura 1.2 Sistema de enfriamiento simplificado asociado a la torre E-951

Fuente: P.D.V.S.A., 2008

La torre de enfriamiento M-7156 diseñada por la empresa INDEIN. El diseño es de flujo cruzado y sirve únicamente de enfriamiento a la Unidad de Alquilación, con el propósito de evitar problemas de contaminación con ácido fluorhídrico en otras áreas. El agua que retorna a la torre se enfría con aire

desde 117 °F hasta 87 °F y se almacena en la piscina de agua fría, como se puede observar en la Figura 1.4.

El agua fría es recirculada hacia los distintos equipos por medio de las bombas G-7160 A/B/C, de 11.000 GPM de capacidad cada una; de las cuales se mantienen dos en operación y una como respaldo.

El propósito de esta investigación es evaluar térmicamente las torres de enfriamiento E-951, M-7154 y M-7156 de la R.E.P., para saber bajo qué condiciones están operando actualmente cada torre y analizar sus desviaciones operacionales que afectan la capacidad térmica de estas a fin de generar alternativas incrementando el potencial térmico y vida útil de las torres de enfriamiento.

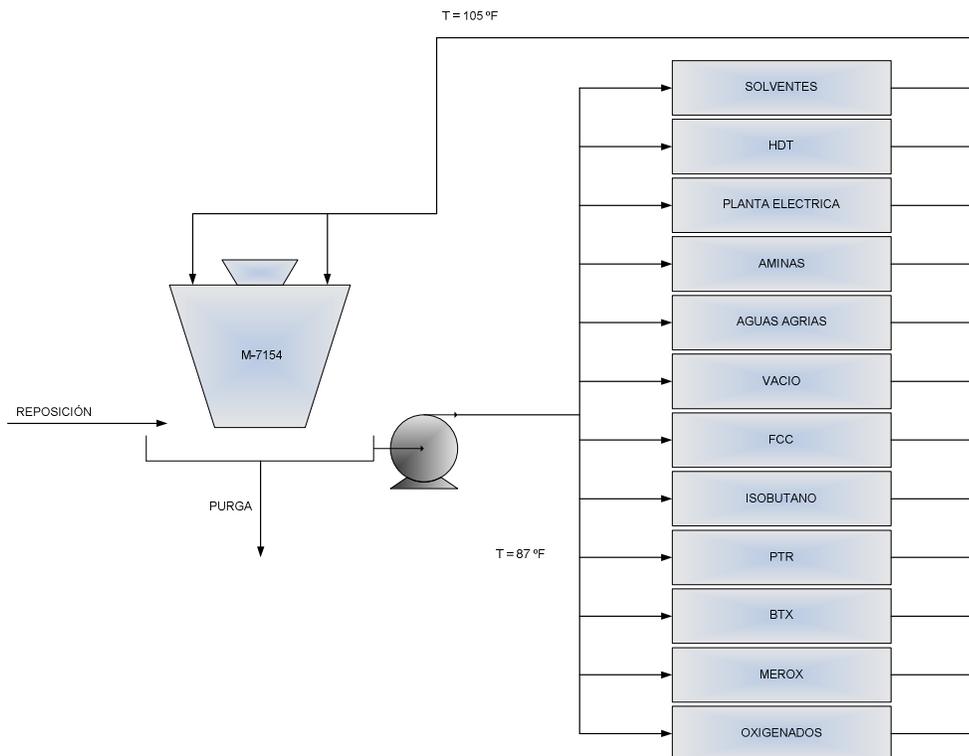


Figura 1.3 Sistema de enfriamiento simplificado asociado a la torre M-7154

Fuente: P.D.V.S.A., 2008

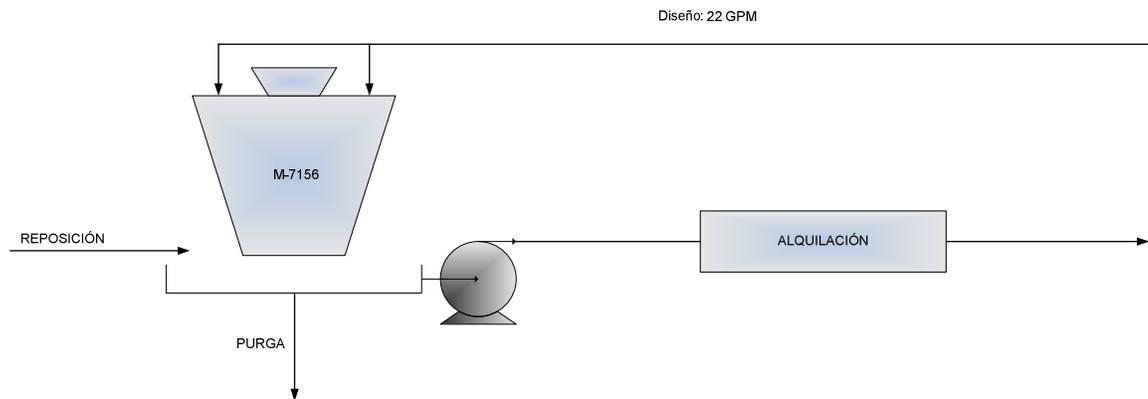


Figura 1.4 Sistema de enfriamiento simplificado asociado a la torre M-7156

Fuente: P.D.V.S.A., 2008

1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El sistema de enfriamiento está constituido por las torres de enfriamiento E-951, M-7154 y M-7156, y se encargan de satisfacer los requerimientos de retiro de calor en las Unidades de Crudo, Solventes, Conversión y tratamiento, Vacío, BTX, PTR, HDT, Planta Eléctrica y Alquilación. En este momento no se tiene la capacidad térmica real de las torres, ni un plan de mantenimiento preventivo, lo cual disminuye la calidad de agua de enfriamiento y la vida útil de las torres, generando mayor consumo de los servicios industriales y por ende mayor gasto para la empresa.

En este sentido, se requiere desarrollar una evaluación térmica del sistema de enfriamiento de las torres de enfriamiento, que identifique las desviaciones operacionales y recomendar alternativas de mejoras que produzcan un programa de mantenimiento capaz de llevar a cabo un proceso de enfriamiento efectivo.

1.3 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar térmicamente las torres de enfriamiento E-951, M-7154 y M-7156 con la finalidad de incrementar la capacidad térmica ubicadas en la R.E.P.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Realizar el diagnóstico térmico de las torres de enfriamiento de la R.E.P.
2. Determinar la capacidad de enfriamiento de cada una de las torres de la R.E.P.
3. Analizar las deficiencias operacionales que afecten la capacidad térmica de las torres de enfriamiento.
4. Generar alternativas que conlleven a incrementar la capacidad térmica y vida útil de las torres de enfriamiento.
5. Desarrollar la(s) alternativa(s) seleccionadas con el fin de mejorar la capacidad de enfriamiento de las torres.
6. Presentar un estimado de costo clase V, para respaldar la toma de decisiones en la implantación de las alternativas generadas.

1.4 JUSTIFICACIÓN

Esta evaluación térmica tiene gran relevancia a nivel social, debido a que P.D.V.S.A. se verá favorecida al implantar las alternativas generadas

incrementando el intercambio térmico en las torres de enfriamiento y por ende disminuyendo los costos asociados al consumo de agua y de energía.

Desde el punto de vista ambiental tiene gran importancia, en vista de que se estaría disminuyendo el consumo de agua necesario para el sistema de enfriamiento, disminuyendo las pérdidas por evaporación, purgas y fugas de este vital líquido en las torres de la R.E.P.

Desde el punto de vista metodológico se espera que la puesta en práctica de estas propuestas suministren los soportes metodológicos a nuevos y futuros trabajos de investigación. Esto coadyuva significativamente a enriquecer la producción de conocimiento intelectual a nivel universitario con miras a mejorar la calidad de los procesos de enfriamiento en el sector petrolero y petroquímico.

Por otro lado, la investigación proporciona a la Universidad de Carabobo Facultad de Ingeniería un documento de interés para reforzar las investigaciones venideras acorde con las necesidades del medio y trae como beneficios aprovechables algunas soluciones a los problemas en el campo de la ingeniería.

Finalmente, como autor, la realización de este trabajo permite adquirir una herramienta metodológica, ya que muestra los pasos a seguir para llevar a cabo la evaluación térmica en torres de enfriamiento sirviendo como base para futuras evaluaciones, representando una área de aplicación esencial en el campo de la ingeniería de procesos.

1.5 LIMITACIONES

Las inspecciones y mediciones concernientes a la Unidad de Alquilarción representan un riesgo químico debido a que esta utiliza para su reacción un catalizador, ácido fluorhídrico, producto tóxico y corrosivo que al contacto con los ojos, piel y membrana mucosas podrían resultar quemaduras graves y dolorosas.

1.6 ALCANCE

La investigación estará delimitada especialmente a la realización de la evaluación térmica de las torres de enfriamiento E-951, M-7154 y M-7156 de la Refinería el Palito conforme a los métodos indicados por el código Cooling Technology Institute. (2000). Acceptance Test Code for Water-Cooling Tower. (CTI Code ATC-105).

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

Este capítulo está conformado en dos divisiones: en la primera se incluyen los antecedentes del trabajo desarrollado y en la segunda se detallan aquellos aspectos de interés teórico referencial requeridos para el desarrollo del tema.

2.1 ANTECEDENTES

Con respecto a Colina, (2002), destaca que es importante diseñar una interconexión en la red de tuberías enfriamiento en las unidades de Conversión y Tratamiento de la R.E.P. de PDVSA para ahorrar los costos asociados a una parada de planta. Para alcanzar esta investigación se creó un diseño de tuberías que permitió realizar la interconexión sin necesidad de detener el flujo de agua de enfriamiento. Como principal conclusión fue la implementación de este diseño en el cual se podrá realizar el mantenimiento de la torre de enfriamiento M-7154, debido a que esta torre no cuenta con un dispositivo que permite el mantenimiento de esta torre sin parar la planta.

Seguidamente Zanotty, (2004), evaluó el sistema de enfriamiento de las unidades de la R.E.P. con el fin de mejorar la actividades operatorias en cada una de las plantas. Para el logro de este trabajo se evaluó las necesidades de agua para enfriamiento en la R.E.P., se generaron alternativas a posibles deficiencias del sistema de enfriamiento para difundirlo en el personal de esta Refinería. Como principal conclusión arrojó que los aspectos que influyen en el funcionamiento de los sistemas de enfriamiento se encuentran: la calidad de agua, estado de los equipos de transferencia de calor y la disponibilidad de los suministros de agua.

Para dar continuidad, Sirena J., y col., (2010), presentaron la predicción analítica del coeficiente de pérdida de carga de varias configuraciones geométricas básicas de rellenos de torres de enfriamiento de agua, del tipo de película y salpicado, y su posterior determinación experimental en dos instalaciones experimentales. Para ello analizaron el coeficiente de pérdida de carga por unidad de longitud de relleno, presentaron predicciones y evaluaciones empíricas de pérdida de carga en rellenos o superficies evaporativas simples de torres de enfriamiento de agua. Como conclusión arrojó que el comportamiento del coeficiente de pérdida de carga en función de la velocidad del flujo de aire es bastante similar en los tres métodos seguidos para su obtención si bien difieren en los valores absolutos, probablemente como consecuencia que los parámetros de similitud que gobiernan el fenómeno no son los mismos.

Asimismo, Goyal J. (2012), presenta una comprensión gradual de los métodos para calcular el número de unidades de transferencia (NUT) para una torre de enfriamiento, y por lo tanto para comprender la base de diseño térmico de contraflujo en dichas torres optimizando costos y rendimiento. Para ello calculan la capacidad de enfriamiento de la torre a través del modelo matemático de Merkel utilizando procesos iterativos. Como conclusión arrojó que los modelos matemáticos aplicados son de importancia para calcular directamente las características de una torre de enfriamiento pudiendo compararla con los datos del proveedor logrando crear un diseño completo y económico.

Finalmente, Durand y col., (2012) destacan que se puede optimizar la recirculación del agua de enfriamiento mediante la selección del valor máximo de temperatura del agua de retorno a la torre de enfriamiento. Para el logro de este trabajo aplicaron un balance de energía en el intercambiador de calor, posteriormente calcularon el costo anual total del agua, utilizaron

una gráfica para determinar la temperatura deseada y finalmente determinaron el índice de estabilidad de Ryznar. Como conclusión principal arrojó que el aumento de los costos de energía, muestra una perspectiva de aumento en los costos de enfriamiento para el bombeo de agua, haciendo que sea más atractiva para seleccionar una mayor temperatura óptima del agua de enfriamiento y al mismo tiempo considerando la tendencia a la formación de incrustaciones de carbonato de calcio.

2.2 BASES TEÓRICAS

Los procesos de enfriamiento industriales son efectuados generalmente por agua, por lo tanto son los más simples conocidos, todo lo que se requiere es exponer la superficie del agua al aire, con un alto grado de eficiencia en dicha exposición. Para comprender estos procesos de enfriamiento se presenta una recopilación de los basamentos teóricos de torres de enfriamientos como son: sus principios, modelos matemáticos, nomogramas y gráficas para el diseño, tipos de torres que permiten una mejor comprensión del tema de estudio.

2.2.1 PRINCIPIOS DE LAS TORRES DE EN ENFRIAMIENTO

Los procesos de enfriamiento del agua se cuentan entre los más antiguos que se conocen. Por lo común, el agua se enfría exponiendo su superficie al aire. Algunos de estos procesos son lentos, como el enfriamiento del agua en la superficie de un estanque; otros son comparativamente rápidos, por ejemplo, el rociado de agua hacia el aire. Todos estos procesos implican la exposición de la superficie del agua al aire en diferentes grados (Perry y col., 1992).

Cuando un líquido caliente se pone en contacto con un gas no saturado, parte del líquido se evapora, lo que disminuye su temperatura. La aplicación

más importante de este principio se da en el uso de las torres de enfriamiento para disminuir la temperatura del agua recirculada, que utilizan los condensadores e intercambiadores de calor en plantas químicas, plantas de energía y unidades de aire acondicionado. Las torres de enfriamiento son columnas de gran diámetro con tipos especiales de empaques diseñados para proporcionar un buen contacto gas-líquido con una baja caída de presión. El agua caliente se distribuye sobre el empaque o relleno por medio de boquillas de aspersión o por unas rejillas de muescas a través de tuberías. El aire circula a través del empaque mediante ventiladores de corriente de aire forzada o inducida, mientras que en algunos diseños la circulación es por convección natural (McCabe y col., 2002).

El proceso de transferencia de calor comprende la transferencia de calor latente debido a la evaporación de una porción pequeña de agua, y la transferencia de calor sensible debido a la diferencia de temperatura entre el agua y el aire. Aproximadamente el 80% de dicha transferencia de calor se debe al latente y el 20% al sensible (Perry y col., 1992).

La posible eliminación teórica de calor por libra de aire circulado en una torre de enfriamiento depende de la temperatura y el contenido de humedad del aire. La temperatura de bulbo húmedo es un indicador del contenido de humedad del aire. Por tanto, desde un punto de vista ideal, ésta es la temperatura teórica más baja a la que se puede enfriar el agua. Prácticamente, la temperatura del agua se acerca, pero no llega a ser equivalente, a la de bulbo húmedo del aire en una torre de enfriamiento, y esto se debe a que es imposible establecer un contacto de toda el agua con el aire fresco conforme ésta desciende por la superficie mojada de llenado hasta el estanque. La magnitud del acercamiento a la temperatura de bulbo húmedo depende del diseño de la torre. Entre otros factores importantes están el tiempo de contacto entre aire y agua, la cantidad de superficie de

llenado y la separación de agua en gotitas. En la práctica, las torres de enfriamiento rara vez se diseñan para acercamientos menores de 2.8 °C (Perry y col., 1992).

2.2.2 TEORÍA DE LAS TORRES DE ENFRIAMIENTO

La teoría del proceso de transferencia de calor en una torre de enfriamiento que ha merecido una aceptación más generalizada es la que desarrolló Merkel. Este análisis se basa en la diferencia del potencial de entalpía como fuerza impulsora. Se supone que cada partícula de agua está rodeada por una película de aire y que la diferencia de entalpía entre la misma y el aire circundante proporciona la fuerza impulsora para el proceso de enfriamiento. La ecuación de Merkel tomado de Perry y col., 1992, se expresa en forma integrada de la manera siguiente:

$$\frac{KaV}{L} = \int_{T_2}^{T_1} \frac{dT}{h' - h} \quad (2.1)$$

en donde:

K = coeficiente de transferencia de masa en lb de agua/(h*ft²).

a = área de contacto en ft²/ft³ de volumen de torre.

V = volumen de enfriamiento activo en ft²/ft³ de área plana.

L = velocidad del agua en lb/(h*ft²).

h' = entalpía del aire saturado a la temperatura del agua en Btu/lb.

h = entalpía de la corriente de aire en Btu/lb.

T1 y T2 = temperaturas del agua en la entrada y la salida en °F.

El lado derecho de la ecuación (2.1) se expresa por completo en términos de las propiedades del aire y el agua y es independiente de las dimensiones de la torre (Perry y col., 1992).

En la Figura 2.1 se ilustran las relaciones del agua y el aire y el potencial impulsor que existe en un torre de contraflujo, en donde el aire fluye en sentido paralelo, pero siguiendo una dirección opuesta al flujo del agua. La comprensión de este diagrama constituye una base importante para entender el proceso de la torre de enfriamiento (Perry y col., 1992).

La línea de operación del agua está representada por la línea AB y se especifica por medio de las temperaturas del agua de la torre en la entrada y la salida. La línea de operación del aire principia en C, verticalmente por debajo de B, y en un punto que tiene una entalpía correspondiente a la temperatura de entrada de bulbo húmedo. La línea BC representa la fuerza impulsora inicial ($h^* - h$). Para enfriar el agua 1 °F, la entalpía por libra de aire aumenta 1 Btu multiplicada por la razón de libras de agua por libra de aire. La relación líquido/gas (L/G) es la pendiente de la línea de operación. El aire que sale de la torre se representa por medio del punto D y la gama de enfriamiento es la longitud proyectada de la línea CD sobre la escala de temperaturas. La diferencia útil de temperaturas en la torre de enfriamiento se ilustra en el diagrama como la diferencia entre la temperatura del agua fría que sale la torre y la temperatura de bulbo húmedo del ambiente (Perry y col., 1992).

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

de saturación y luego en sentido vertical a la coordenada de temperaturas. La integral (I) se representa por medio del área ABCD de este diagrama, y dicho valor se conoce como la característica de torre, que varía con la razón (L/G) (Perry y col., 1992).

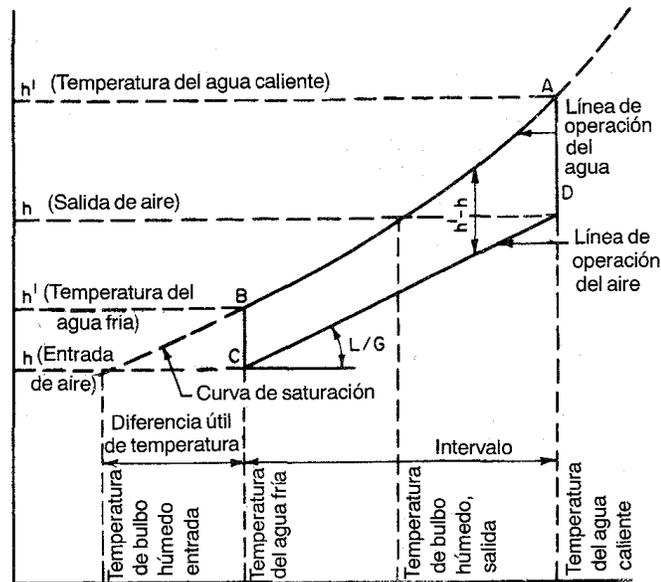


Figura 2.1 Balance calórico de un proceso de enfriamiento

Fuente: Perry y col., 1992

Para predecir el rendimiento de la torre, es necesario conocer las características de torre requeridas para condiciones específicas tanto del ambiente como del agua.

La característica de torre KaV/L se determina mediante una integración. El método de Chebyshev tomado de Perry y col., 1992, para evaluar numéricamente la integral es el que se emplea con mayor frecuencia y, según la ecuación 2.2.

$$\frac{KaV}{L} = \int_{T_2}^{T_1} \frac{dT}{h_w - h_a} \cong \frac{T_1 - T_2}{4} \left(\frac{1}{\Delta h_1} + \frac{1}{\Delta h_2} + \frac{1}{\Delta h_3} + \frac{1}{\Delta h_4} \right) \quad (2.2)$$

en donde:

h_w = entalpía de la mezcla de aire-vapor de agua a la temperatura masiva del agua en Btu/lb de aire seco.

h_a = entalpía de la mezcla de aire-vapor de agua a la temperatura de bulbo húmedo en Btu/lb de aire seco.

Δh_1 = valor de $(h_w - h_a)$ a $T_2 + 0.1 \cdot (T_1 - T_2)$

Δh_2 = valor de $(h_w - h_a)$ a $T_2 + 0.4 \cdot (T_1 - T_2)$

Δh_3 = valor de $(h_w - h_a)$ a $T_1 - 0.4 \cdot (T_1 - T_2)$

Δh_4 = valor de $(h_w - h_a)$ a $T_1 - 0.1 \cdot (T_1 - T_2)$

Un método más rápido, aunque menos exacto, consiste en utilizar un nomograma preparado por Woods y Betts (Figura 2.2). Por lo común, las torres de enfriamiento con tiro mecánico se diseñan para razones de (L/G) que van de 0.75 a 1.50 así, los valores de $Ka \cdot V/L$ varían de 0.50 a 2.50. Teniendo estos intervalos en mente, a continuación se incluye un ejemplo del empleo del nomograma que explicará con mayor claridad el efecto del cambio de variables (Perry y col., 1992).

El nomograma proporciona una solución aproximada, y el grado de exactitud variará con los cambios producidos en el enfriamiento, así como con la torre de que se trate. Una vez determinada la característica teórica de la torre de enfriamiento por integración numérica o basándose en el nomograma, para un trabajo de enfriamiento determinado, es necesario diseñar el llenado de la torre y la distribución del aire para satisfacer la característica de torre teórica. La Pritchard Co., ha desarrollado datos de desempeño y funcionamiento relacionados con varios diseños de llenado de torre. Estos datos son demasiado extensos para incluirse aquí, de manera que los que se interesen en ellos deberán consultar tal referencia (Perry y col., 1992).

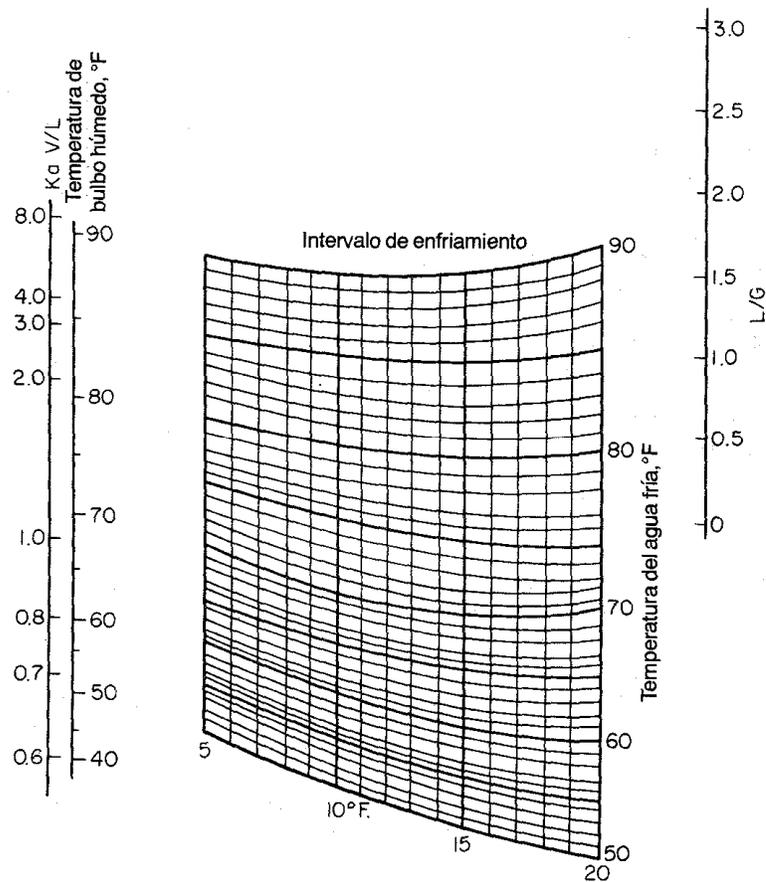


Figura 2.2. Nomograma de las características de una torre de enfriamiento

Fuente: Perry y col., 1992

Las características del rendimiento de los diferentes tipos de torres de enfriamiento variarán con el valor de altura, configuración del relleno y configuración de flujo interno, que puede ser del tipo cruzado o contraflujo (Lyons, 1996).

Cuando se requieran las características generales de una torre específica el Nomograma de características del rendimiento (Figura 2.3) puede ser utilizado.

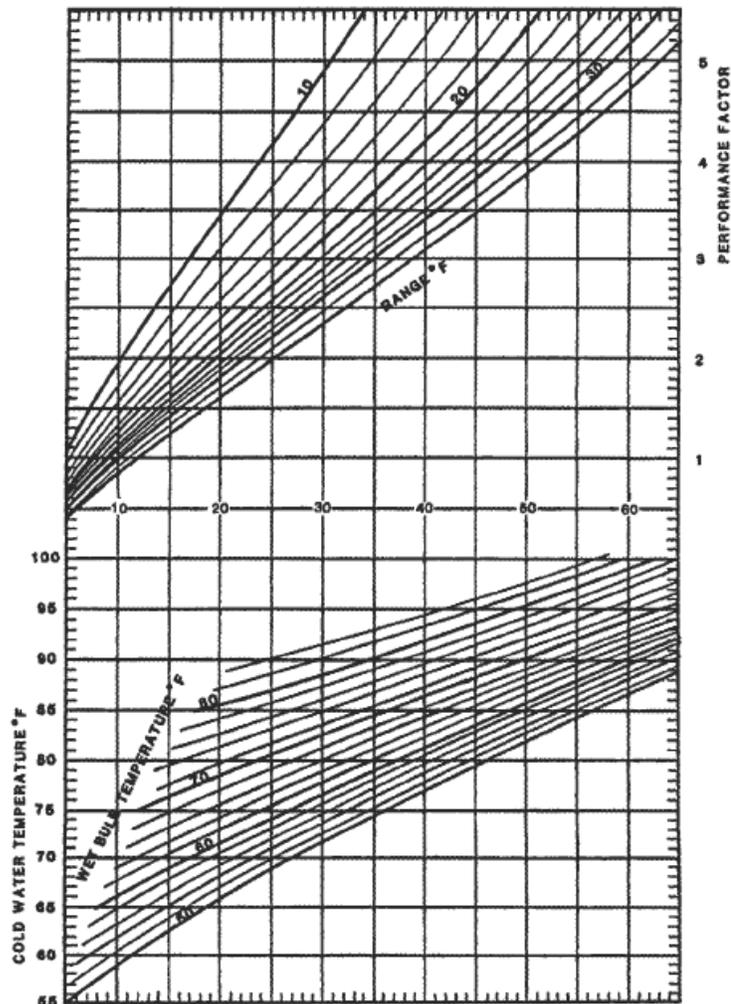


Figura 2.3 Nomograma de características del rendimiento.

Fuente: Lyons, 1996

Según la comunidad de profesionales pertenecientes al Instituto Americano de Ingenieros Químicos “American Institute of Chemical Engineers (AIChE)” exponen la Tabla 2.1 el cual muestra las condiciones del agua al estar en contacto con el relleno de una torre de enfriamiento.

Tabla.2.1 Condiciones para la recirculación de agua en las torres de enfriamiento

pH	Rango ideal 6.5-8.0. Valor de pH menor a 5.0 es aceptable si el acero galvanizado no está presente.
Cloruros	Concentración máxima 750 ppm (como NaCl) para acero galvanizado, 1.500 ppm para acero inoxidable del tipo 300 y 4000 ppm del tipo 316. El bronce de silicio es el material preferido si los cloruros superan 4000 ppm.
Calcio	En general, el calcio (CaCO_3) por debajo de 800 ppm no debe resultar en la escala de sulfato de calcio. En los climas áridos, el nivel crítico puede ser mucho menor. Para la formación de carbonato de calcio, calcular el Índice de Saturación Langelier o el índice de estabilidad Ryznar.
Sulfatos	Si la concentración de calcio es superior a 800 ppm, los sulfatos deben limitarse a 800 ppm, y a un valor menor en climas áridos. De lo contrario, un nivel de sulfato de hasta 5000 ppm es aceptable.
Sílice	En general, el Sílice tiene una concentración límite de 150 ppm como SiO_2 .
Hierro	Concentración límite 3 ppm. Tenga en cuenta que la excesiva concentración de hierro puede manchar componentes de la torre de enfriamiento, pero estas manchas no son el resultado de cualquier oxidación o corrosión.
Manganeso	Concentración límite 0.1 ppm.
Sólidos Totales Disueltos	Más de 5000 ppm puede afectar negativamente el rendimiento térmico y puede ser perjudicial para la madera de la torre de enfriamiento.
Sólidos en suspensión	Límite máximo de 150 ppm si los sólidos son abrasivos. Evite película de relleno si los sólidos son fibrosos, grasas, o alquitranadas.
Aceites y Grasas	Más de 10 ppm hará evidente la pérdida de rendimiento térmico.
Nutrientes	Nitratos, amoníaco, aceites, glicoles, alcoholes, azúcares y fosfatos, pueden promover el crecimiento de algas y de limo. Este crecimiento puede causar problemas de la torre, en particular sobre el relleno.
Amoniaco	Límite máximo de 50 ppm, si las aleaciones de cobre están presentes.
Solventes Orgánicos	Estos pueden atacar a los plásticos y debe ser evitado.
Demanda Biológica de Oxígeno (DBO)	Concentración límite de 25 ppm, en particular si los sólidos en suspensión están sobre los 25 ppm.
Sulfuros	Concentración límite 1 ppm.
Índice de Saturación Langelier (ISL)	Mantener entre -0.5 y +0.5. Un (ISL) negativo indica tendencias de corrosión. Un (ISL) positivo indica tendencias de escala CaCO_3 .

Fuente: Ludwing, 1997.

2.2.3 TORRES DE TIRO MECÁNICO

En la actualidad se emplean dos tipos de torres de tiro mecánico; el de tiro forzado (Figura 2.4) y el de tiro inducido. En la torre de tiro forzado, el

ventilador se monta en la base y se hace entrar el aire en la base de la misma y se descarga con baja velocidad por la parte superior. Esta disposición tiene la ventaja de ubicar el ventilador y el motor propulsor fuera de la torre, sitio muy conveniente para la inspección, el mantenimiento y la reparación de los mismos. Puesto que el equipo queda fuera de la parte superior caliente y húmeda de la torre, el ventilador no está sometido a condiciones corrosivas; sin embargo, dada la escasa velocidad del aire de salida, la torre de tiro forzado está sujeta a una recirculación excesiva de los vapores húmedos de salida que retornan a las entradas de aire. Puesto que la temperatura de bulbo húmedo del aire de salida es mucho mayor que la del aire circundante, existe una reducción en el buen desempeño, lo cual se evidencia mediante un incremento en la temperatura de agua fría (saliente).

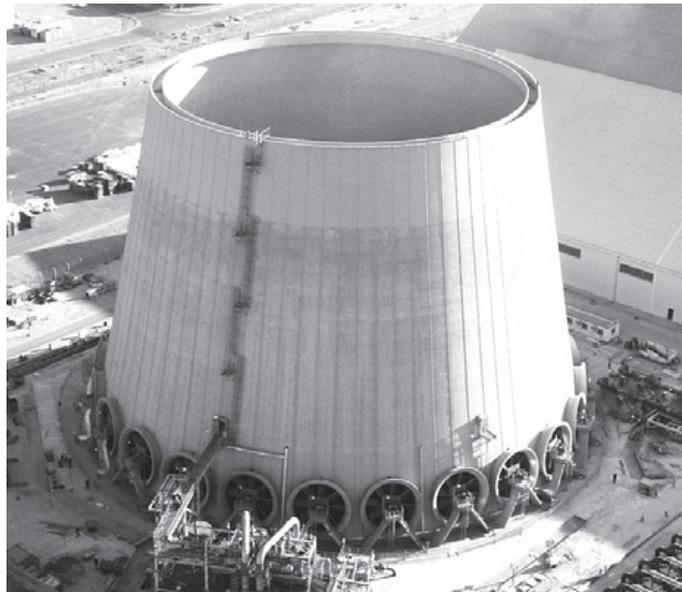


Figura 2.4. Torre de tiro forzado

Fuente: Hensley, 2009

La torre de tiro inducido es el tipo que se emplea con mayor frecuencia en Estados Unidos. A su vez, esta clase general se subdivide en diseños de

contraflujo (contracorriente) (Figura 2.5) o flujo transversales (cruzado) (Figura 2.6), dependiendo de las direcciones relativas de flujo del agua y el aire. Desde el punto de vista termodinámico, la configuración a contraflujo es más eficaz, ya que el agua más fría entra en contacto con el aire más frío, obteniendo así un potencial máximo de entalpía. Cuanto mayores son los intervalos de enfriamiento y más difícil la diferencia útil de temperaturas, tanto más evidente serán las desventajas del tipo de contraflujo.

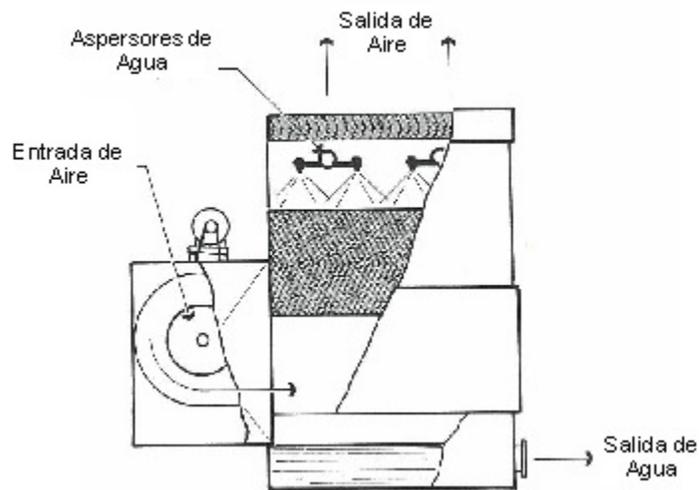


Figura 2.5. Torre de contraflujo

Fuente: Hensley, 2009

El fabricante de torres de flujo transversal puede reducir con eficacia la característica de torre a acercamientos muy bajos incrementando la cantidad de aire para proporcionar una razón (L/G) más baja. El aumento en el flujo de aire no se logra necesariamente incrementando la velocidad del mismo, sino sobre todo alargando la torre para aumentar el área de corte transversal para el flujo de aire. Así pues, es obvio que el llenado para flujos transversales se hace progresivamente más largo en la dirección perpendicular al flujo del aire y más corto en la dirección de éste, hasta que casi pierde su desventaja inherente de la diferencia de potencial. Con todo, al lograr esto se incrementa

el consumo de potencial de ventilador. Por último, la elección económica entre el sistema a contraflujo y el transversal se determina según la eficiencia del relleno, las condiciones de diseño y los costos de construcción de la torre (Perry y col., 1992).

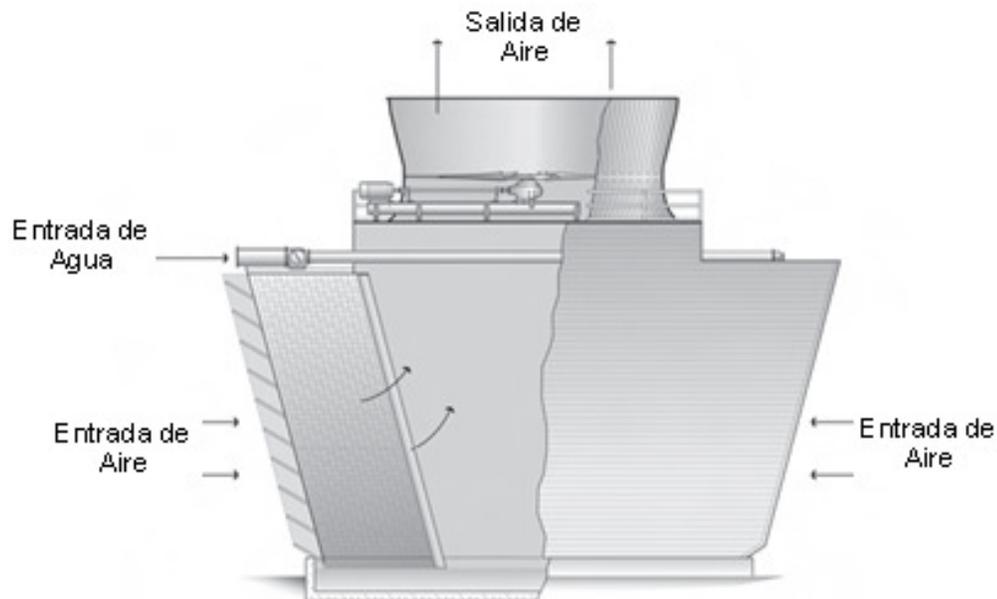


Figura 2.6 Torre de flujo transversal

Fuente: Hensley, 2009

El resultado del funcionamiento de un tipo específico de torre de enfriamiento está dictaminado por la razón de los pesos de aire y agua y el tiempo de contacto entre uno y otra. En la práctica comercial, la variación en la razón de aire a agua se obtiene primeramente manteniendo constante la velocidad del aire a $350 \text{ ft}/(\text{min} \cdot \text{ft}^2)$ de área activa de la torre) y haciendo variar la concentración de agua, $\text{gal}/(\text{min} \cdot \text{ft}^2)$ de área de torre). Como operación secundaria, la velocidad del aire se altera para que la torre se adapte al requisito de enfriamiento (Perry y col., 1992).

El tiempo de contacto entre el agua y el aire se dictamina en mayor grado por el tiempo necesario para que el agua se descargue por las boquillas y caiga

a través de la torre hasta el depósito. En consecuencia, el tiempo de contacto se obtiene en un tipo determinado de unidad haciendo variar la altura de la torre. Si el tiempo de contacto es insuficiente, ningún incremento en la relación de aire a agua generará el enfriamiento deseado. Por tanto, es necesario mantener cierta altura mínima en las torres de enfriamiento (Perry y col., 1992).

En la Figura 2.7 se ilustra la relación entre el agua caliente, el agua fría y las temperaturas de bulbo húmedo en función de la concentración del agua. Con estos datos se obtiene el área mínima necesaria para un funcionamiento específico de una torre de enfriamiento de tiro inducido y a contraflujo bien diseñada. Cabe destacar que esto aplica para torres de tiro inducido con un sistema de aspersion ascendente y 24 ft de llenado, o un sistema de distribución tipo canalón y 32 ft de llenado. La gráfica proporcionará aproximaciones para torres de cualquier altura (Perry y col., 1992).

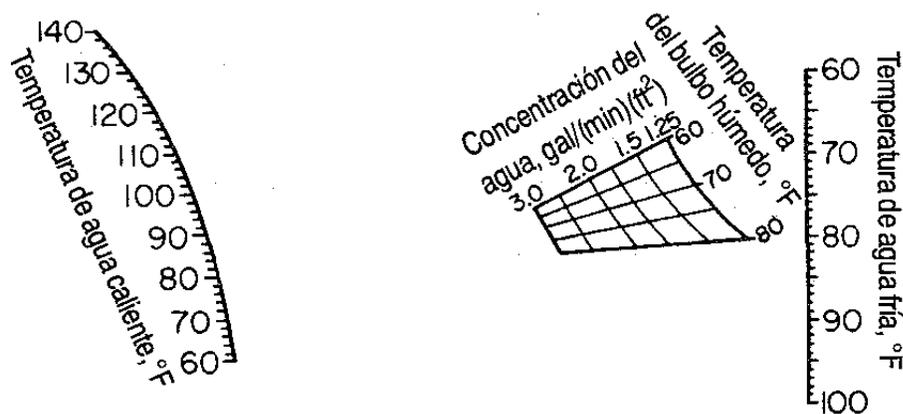


Figura 2.7. Gráfica para determinar las dimensiones de una torre de enfriamiento de tiro inducido a contracorriente

Fuente: Perry y col., 1992

En la Figura 2.8 se señala el caballaje por ft^2 de área de torre que se requiere para un funcionamiento en particular. Estas curvas no se aplican al

enfriamiento de flujos paralelos o transversales, ya que tales procesos no son tan eficientes como el de contraflujo. Asimismo, no se aplican en los casos en que la diferencia útil de temperaturas a la temperatura del agua fría es menor que 2.8 °C. Estas cartas se deben considerar como aproximaciones y sólo como estimaciones preliminares. Puesto que en los cálculos se deben incluir muchos factores que no aparecen en las gráficas, conviene consultar con el fabricante las recomendaciones finales de diseño (Perry y col., 1992).

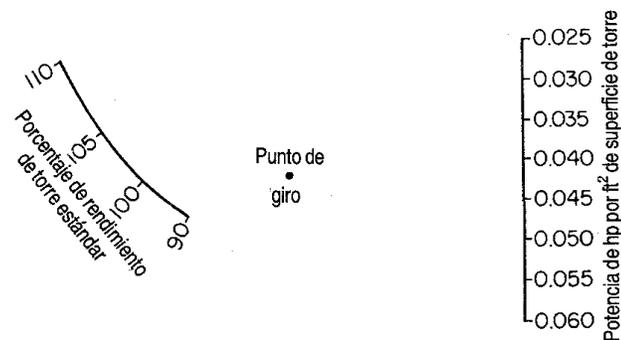


Figura 2.8. Gráfica de caballos de potencia para una torre de enfriamiento de tiro inducido y contraflujo

Fuente: Perry y col., 1992

El funcionamiento de enfriamiento de cualquier torre que tiene una profundidad dada varía con la concentración del agua. Se ha encontrado que el máximo contacto y el mejor rendimiento se obtienen con torres que poseen una concentración de agua de 2 a 5 gal/(min ft de área de suelo). Por ende, el problema de calcular el tamaño de una torre de enfriamiento consiste en determinar la concentración apropiada de agua que se necesita para alcanzar los resultados deseados. Después de determinar la concentración de agua necesaria, el área de torre se calcula dividiendo los gal/mm que circulan entre la concentración del agua expresada en gal/(min)(ft²). El tamaño de torre necesario es, en función de lo siguiente:

- Intervalo de enfriamiento (temperatura del agua caliente menos temperatura del agua fría).
- Diferencia útil de temperaturas a la temperatura de bulbo húmedo (temperatura del agua fría menos temperatura de bulbo húmedo).
- Cantidad de agua que se va a enfriar.
- Temperatura de bulbo húmedo.
- Velocidad del aire a través de la celda.
- Altura de la torre.

En la Figura 2.9 se ilustra el tipo de curva de rendimiento proporcionada por el fabricante de la torre de enfriamiento. Esto corrobora la variación en el rendimiento en función de los cambios de temperatura tanto de bulbo húmedo como de agua caliente, mientras que la cantidad de agua se mantiene constante (Perry y col., 1992).

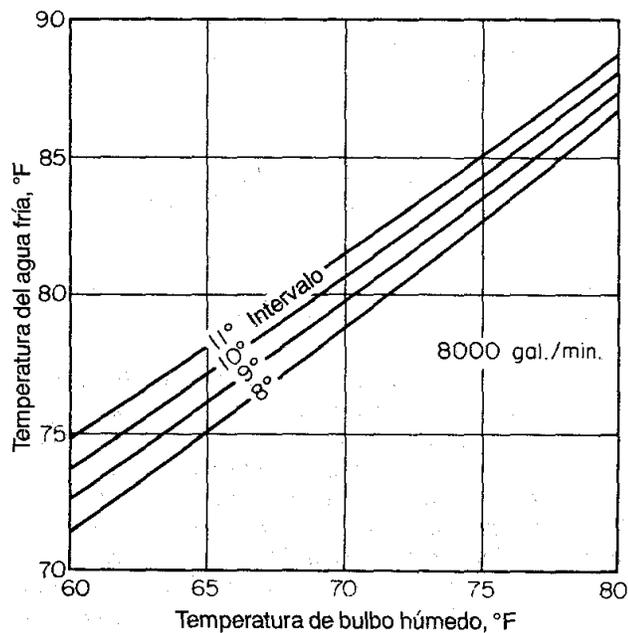


Figura 2.9 Curva de rendimiento de una torre de enfriamiento usual.

Fuente: Perry y col., 1992

2.2.4 TORRES DE TIRO NATURAL

Las torres de tiro natural o de tipo hiperbólico (Figura 2.10) comenzaron a utilizarse en Europa a partir de 1916, aproximadamente, y se han convertido en una práctica estándar para los requisitos de enfriamiento de agua de las estaciones generadoras de Gran Bretaña. Estas son esenciales apropiadas para cantidades muy grandes de enfriamiento y las estructuras de concreto reforzado que se acostumbra utilizar llegan a tener diámetros del orden de 80.7 m y alturas de 103.6 m.

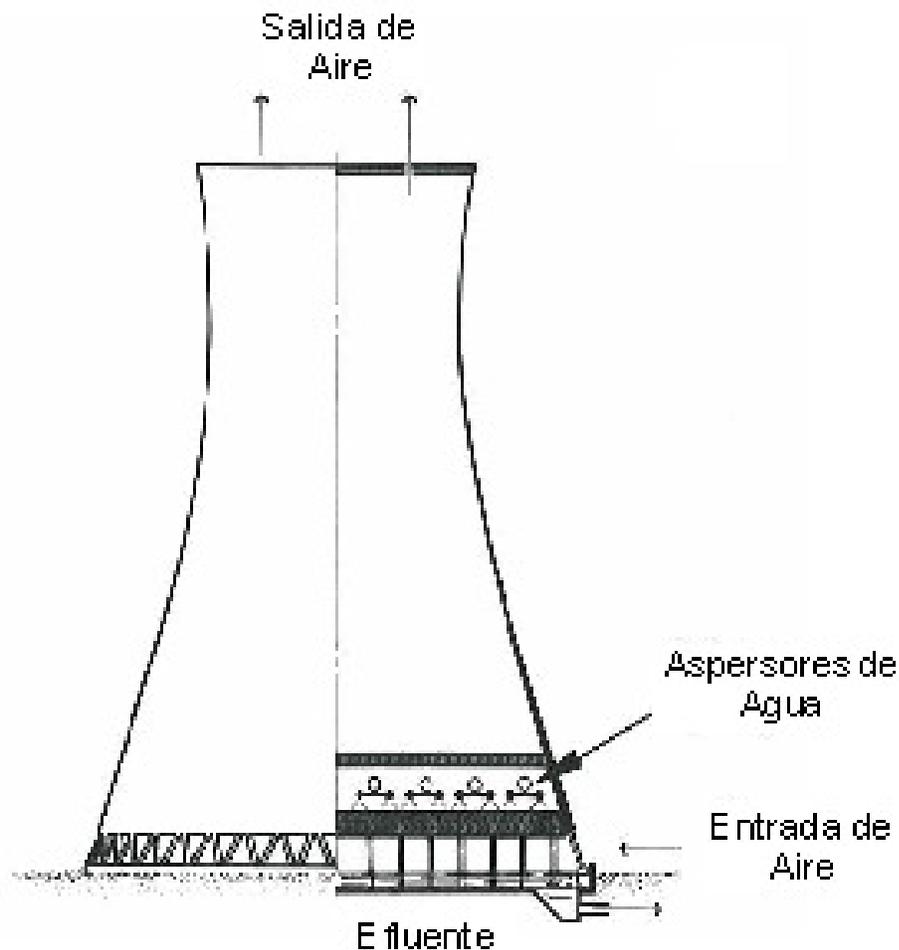


Figura 2.10. Torre de tiro hiperbólico

Fuente: Hensley, 2009

La conveniencia de diseño obtenida gracias al flujo constante del aire de las torres de tiro mecánico no se logra en un diseño de torre de tiro natural. El flujo de aire a través de la torre de tiro natural se debe en su mayor parte a la diferencia de densidad entre el aire fresco de la entrada y el aire tibio de la salida. El aire expulsado por la columna es más ligero que el del ambiente, y el tiro se crea por el efecto de chimenea, eliminando con ello la necesidad de ventiladores mecánicos (Perry y col., 1992).

El rendimiento de la torre de tiro natural difiere del de la torre de tiro mecánico en que el enfriamiento depende de la humedad relativa tanto como de la temperatura de bulbo húmedo. El tiro aumenta a través de la torre en condiciones de gran humedad, debido al incremento en la diferencia de presión estática disponible para promover el flujo del aire venciendo las resistencias internas. Por lo tanto, cuanto mayor sea la humedad a una temperatura de bulbo húmedo en particular, tanto más fría será el agua de salida para un conjunto de condiciones específicas. Esta relación fundamental se ha utilizado con gran provecho en Gran Bretaña, en donde las humedades relativas son por lo común del 75 al 80%. Por lo tanto, en las etapas de diseño es de vital importancia determinar correctamente y especificar la densidad del aire que entra y sale, además de las condiciones usuales del diseño de torre, de la gama, la diferencia útil de temperaturas y la cantidad de agua. La relación de rendimiento con las condiciones de humedad permite un control exacto de la temperatura del agua de salida que es difícil lograr en una torre de tiro natural (Perry y col., 1992).

Los datos para determinar el tamaño de las torres de tiro natural fueron presentados por Chilton [Proc. Inst. Elec. Eng. (1952)], y Rish y Steel (ASCE Symposium on Thermal Power Plants, October 1958, tomado de Perry y col., 1992). Chilton demostró que el coeficiente de trabajo Dt de una torre es más

o menos constante en su gama normal de operación, y se relaciona con el tamaño de torre a través de un factor de eficiencia o coeficiente de rendimiento D_t como se indica a continuación:

$$D_t = \frac{(A * \sqrt{Z_t})}{(C_t * \sqrt{L_t})} \quad (2.3)$$

en donde:

A = área de base de la torre en ft^2 , medida al nivel del reborde del estanque.

Z_t = altura de la torre en ft, medida por encima del nivel del reborde.

El coeficiente de trabajo se determina aplicando la siguiente fórmula:

$$\left(\frac{W_L}{D_t}\right) = 90.59 * \left(\frac{\Delta h}{\Delta T}\right) * \sqrt{\Delta t + 0.3124 * \Delta h} \quad (2.4)$$

en donde:

Δh = cambio en el calor total del aire que atraviesa la torre en Btu/lb.

ΔT = cambio en la temperatura del agua que atraviesa la torre en $^{\circ}\text{F}$.

Δt = diferencia entre la temperatura del aire que sale de la columna y la temperatura de bulbo seco en la entrada en $^{\circ}\text{F}$.

W_L = carga de agua de la torre en lb/h.

El aire que sale del empaque de la torre se supone en condiciones saturadas a una temperatura intermedia entre las temperaturas del agua en la entrada y la salida. La divergencia, de unos cuantos grados entre la teoría y la práctica en esta última suposición no afecta en forma notable los resultados, ya que la componente de tiro depende de la razón del cambio de densidad al cambio

de calor total y no del cambio de temperatura exclusivamente (Perry y col., 1992).

Para determinar la forma en que una torre de tiro natural de cualquier coeficiente de trabajo dado funcionará en condiciones variables, Rish y Steel construyeron el nomograma que se muestra en la Figura 2.11.

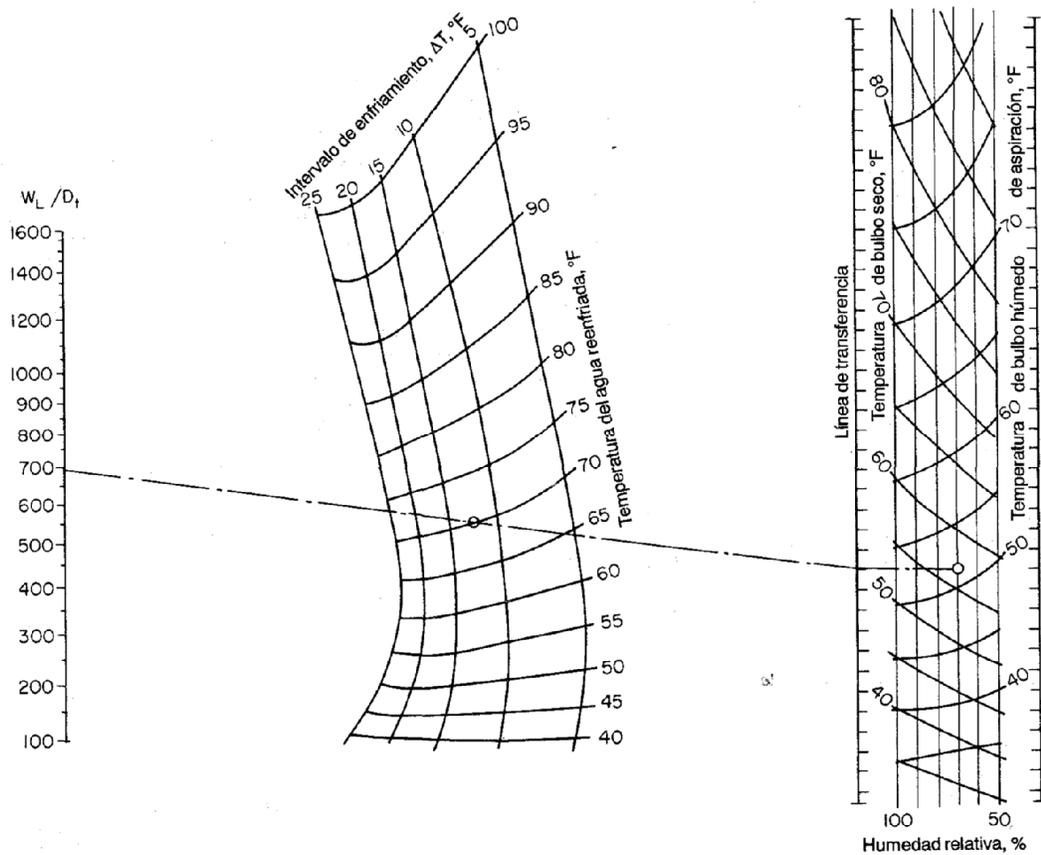


Figura 2.11. Gráfica universal de rendimiento para torres de enfriamiento de tiro natural

Fuente: Perry y col., 1992

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

En el presente capítulo se presentan de manera secuencial los distintos pasos para el cumplimiento de los objetivos propuestos, así como las técnicas y herramientas usadas durante su realización.

3.1 TIPO DE ESTUDIO Y TIPO DE INVESTIGACIÓN

De acuerdo a su modalidad, este estudio de investigación se apoya en un proyecto factible conformado por fase de investigación, diagnóstico, procedimiento metodológico, análisis y desarrollo de una propuesta viable apoyada en una investigación de campo, cuyo propósito es incrementar la capacidad térmica (U.P.E.L., 2006).

Según la estrategia utilizada en la recolección de los datos, el presente trabajo de maestría se clasifica como investigación de campo, en virtud que los datos son tomados in situ, sin manipular ni controlar variables, a través de todo el sistema de enfriamiento (U.P.E.L., 2006).

3.2 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

Para el logro de los objetivos planteados se muestra en forma detallada la metodología que será aplicada en tres fases.

Fase 1: Diagnóstico térmico de las torres de enfriamiento de la R.E.P.

Es conveniente para dar inicio al diagnóstico de las torres de enfriamiento E-951, M-7154 y M-7156 establecer una serie de actividades que conlleve a la evaluación térmica de dichas torres, esto con la finalidad de aplicar una secuencia lógica al momento de ejecutar dicha evaluación garantizando tanto

la confiabilidad de los datos medidos en campo como la disminución del tiempo en la ejecución mostrado en la en la Tabla 3.1.

Tabla. 3.1 Procedimiento para la evaluación térmica

 PDVSA	PROCEDIMIENTO PARA LA EVALUACIÓN TÉRMICA	Pág. 1 de 2
		Rev 1
		Dic -2011
<ol style="list-style-type: none"> 1. Conocer técnicamente y químicamente el proceso de enfriamiento mediante la descripción de proceso. 2. Identificar los elementos del sistema de enfriamiento mediante la revisión de diagrama de flujo de procesos (D.F.P.) y diagrama de tuberías e instrumentación (D.T.I.) 3. Identificar la ubicación de cada equipo en cada una de las plantas mediante los planos de ubicación (Plot Plans). 4. Seleccionar el método de evaluación térmica de acuerdo con la documentación entregada por la institución u organismo requeriente por la evaluación. 5. Validar los parámetros de diseño de las torres de enfriamiento mediante un balance de energía. 6. Identificar las variables a medir de acuerdo al método seleccionado para la evaluación térmica. 7. Solicitar los registros históricos de los parámetros que serán medidos en campo. 8. Calcular el número de estaciones para cada torre según el código ATC-105. 		

9. Hacer un recorrido en campo para verificar la existencia así como el estado de la instrumentación y red de tuberías asociada al sistema de enfriamiento.
10. Identificar en campo los puntos de medición de flujo y temperatura en la red de tuberías asociada a las torres de enfriamiento.
11. Seleccionar los instrumentos y conocer la técnica para realizar la medición de los parámetros requeridos para la evaluación.
12. Acondicionar los puntos para la medición de flujos y temperaturas a realizar en campo.
13. Definir las condiciones de operación y físicas de las torres con el departamento responsable, considerando las recomendaciones del código ATC-105.
14. Diseñar las tablas para asentar tanto los datos medidos como las inspecciones visuales realizadas en campo.
15. Solicitar y obtener permiso de trabajo (emitido en el sitio donde se ejecutará la labor).
16. Realizar las mediciones de los diferentes parámetros necesarios para realizar la evaluación térmica.
17. Realizar inspección visual de la infraestructura de cada torre.

Seguidamente se revisó la descripción de proceso de las torres de enfriamiento documento suministrado por P.D.V.S.A. el cual contiene la descripción detallada del proceso, operación y control del sistema de enfriamiento, así como parte de la consolidación de esta información se

realizó algunas entrevistas informales a los ingenieros de procesos del área identificando las diferentes partes que conforman estas torres. Luego con descripción detallada del proceso extraemos los datos de diseño de cada torre de enfriamiento y procedemos a la validación de datos de diseño.

3.2.1 Validación de los datos de diseño

La validación se realizó mediante el desarrollo de los balances de masa y energía en las torres de enfriamiento determinando la demanda calórica del sistema de enfriamiento. Mediante la figura 3.1 distinguiremos dos volúmenes de control, el primer volumen de control 1 (VC1) intervienen cuatro corrientes y un segundo volumen de control 2 (VC2) en el cual intervienen dos corrientes mostradas en la Figura 3.1.

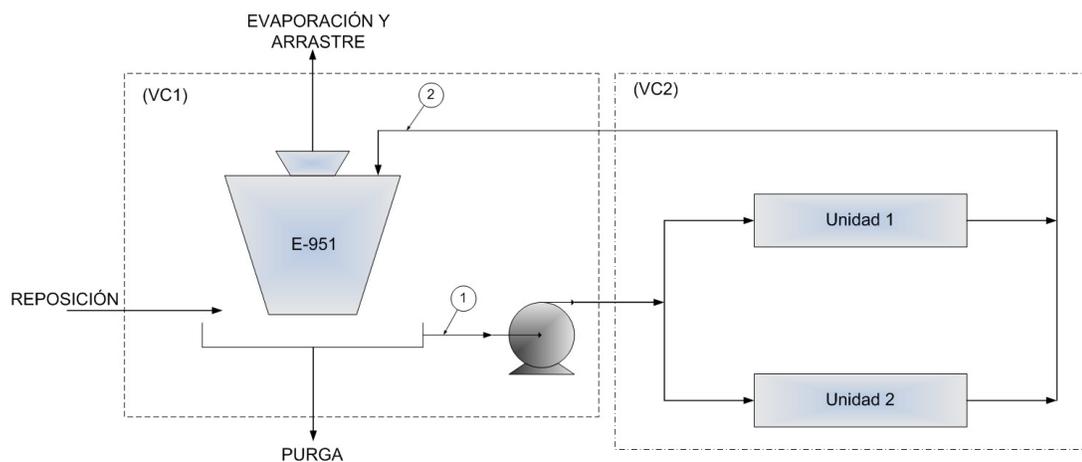


Figura 3.1 Sistema de enfriamiento

Para el (VC1) el balance de masa queda expresado en la ecuación 3.1.

$$R + F_2 = F_1 + P + A + E \quad (3.1)$$

en donde:

F_1 : flujo de agua fría de salida hacia las diferentes unidades, GPM.

F_2 : flujo de agua caliente de entrada hacia la torre, GPM.

R : flujo de agua de reposición, GPM.

P : flujo de la purga, GPM.

A : flujo de agua perdido por arrastre, GPM.

E : flujo de agua perdida por evaporación, GPM.

Considerando que existe cierta diferencia entre los flujos F_1 y F_2 ocasionada por las pérdidas en las unidades para simplificar la ecuación 3.1 asumiremos $F_1 = F_2$.

El flujo de la purga depende de la calidad del agua. Para determinar este término se realizó un balance de masa considerando la dureza del agua en cada corriente. Asimismo, Gougol y col. (2009), destacan que el arrastre corresponde al 0.32% del flujo bombeado hacia las unidades quedando el balance de masa expresado en la ecuación 3.2.

$$D_R \cdot R = 0.0032 \cdot D_P \cdot F_1 + D_P \cdot P \quad (3.2)$$

en donde:

D_R : dureza del agua en la corriente de reposición

D_P : dureza del agua en la corriente de purga

El flujo de agua perdida por evaporación puede ser determinada a través de un balance de masa en la corriente del gas, expresada en la ecuación 3.3.

$$E = G \cdot (Y_2 - Y_1) \quad (3.3)$$

en donde:

G: flujo de aire de entrada y salida de la torre de enfriamiento (se asume flujo constante), GPM.

Y_1 : humedad absoluta del aire antes de ingresar a la torre.

Y_2 : humedad absoluta del aire en el tope de la torre (puede asumirse como aire saturado).

El balance de energía para el mismo volumen de control queda expresado en la ecuación 3.4.

$$R \cdot Cp \cdot (T_R - T_0) + F_2 \cdot Cp \cdot (T_{hw} - T_0) + G \cdot h_{G1} = (F_1 + P) \cdot Cp \cdot (T_{cw} - T_0) + G \cdot h_{G2} \quad (3.4)$$

en donde:

Cp: capacidad calorífica del agua, Btu/lb*°F

T_R : temperatura del agua de reposición, °F.

T_0 : temperatura de referencia, °F.

T_{hw} : temperatura del agua caliente en el tope de la torre, °F.

T_{cw} : temperatura del agua fría en el fondo de la torre, °F.

h_{G1} : entalpía del aire antes de entrar a la torre, Btu/lb.

h_{G2} : entalpía del aire en el tope de la torre, Btu/lb.

Para la determinación del calor retirado (Q_P) por el agua de enfriamiento en las diferentes unidades del sistema medido en MMBtu/h, se realizará un balance de energía en el (VC2), expresado en la ecuación 3.5.

$$Q_P = F_2 \cdot Cp \cdot (T_{hw} - T_0) - F_1 \cdot Cp \cdot (T_{cw} - T_0) \quad (3.5)$$

en donde:

Q_p : Calor retirado, MMBTU/h.

Si las pérdidas de agua son despreciables, la ecuación anterior se puede escribir como:

$$Q_p = F_1 \cdot Cp \cdot (T_{hw} - T_{cw}) \quad (3.6)$$

Al utilizar la ecuación 3.6 sustituyendo los datos de diseño calculamos el calor retirado por el agua de enfriamiento y comparamos con el valor del calor retirado por el agua de enfriamiento de diseño, el resultado al comparar dichos calores, es que no debe existir desviación alguna, de esta forma validaremos todos los datos de diseño suministrado por el fabricante de las torres.

Luego el departamento de ingeniería de procesos de P.D.V.S.A. recomendó utilizar el código Cooling Technology Institute. (2000). Acceptance Test Code for Water-Cooling Tower. (CTI Code ATC-105), ya que esta promueve la seguridad de las instalaciones industriales, reduce las pérdidas económicas causadas por resultados erróneos, protege el medio ambiente, proporcionando una fuente de consulta y orientación en el área de transferencia de calor tanto en las torres de enfriamiento como en el rendimiento de los sistemas de refrigeración. Por consiguiente dicho código se empleó en la determinación de la capacidad térmica en torres de enfriamiento de tiro inducido. Asimismo este código nos muestra la instrumentación y procedimientos requeridos para las pruebas y evaluación del desempeño de las torres de enfriamiento.

Seguidamente se identificó cada parte de las torres de enfriamiento así como la instrumentación y el sistema de tuberías asociadas a estas a través de los

DTI correspondientes para cada torre, este diagrama de tubería e instrumentación nos muestra gráficamente la secuencia de equipos, tuberías y accesorios que conforman el sistema de enfriamiento determinando en número de equipos que conforman dicha sección y mostrándonos el conocimiento de la trayectorias tanto el recorrido de agua caliente provenientes de las diferentes unidades de la R.E.P. así como el recorrido de agua fría proveniente de cada torre hacia las diferentes unidades. Luego basándonos en el código Cooling Technology Institute. (2000). Acceptance Test Code for Water-Cooling Tower. (CTI Code ATC-105), procedemos a elaborar unas tablas de recolección de datos a medir en campo.

Finalmente antes de ingresar a campo y comenzar la recolección de datos mediante el medidor de flujo HFM (ver Figura 3.2), medidor de temperatura FLUKE 66 (ver Figura 3.3) y mediante un anemómetro digital Extech (ver Figura 3.4) se preparó un esquema de trabajo basado en el código Cooling Technology Institute. (2000). Acceptance Test Code for Water-Cooling Tower. (CTI Code ATC-105), previo al ingreso de las diferentes unidades de la R.E.P. el cual garantizará la ejecución de la evaluación con exactitud en el momento de realizar las mediciones e inspecciones en cada torre de enfriamiento de la R.E.P. y por ende disminuyendo el tiempo de ejecución de esta evaluación.

Fase 2: Determinación de la capacidad de enfriamiento

Para comenzar con esta fase se revisó los planos concernientes con las dimensiones generales y disposición de tuberías obteniendo el área por donde entra el aire hacia la torre, esto con la finalidad de poder determinar el número de estaciones mediante la siguiente ecuación tomado del código Cooling Technology Institute. (2000). Acceptance Test Code for Water-Cooling Tower. (CTI Code ATC-105), mostrada en la ecuación 3.7.

$$n = (K)(A)^{0,4} \quad (3.7)$$

n : número mínimo de estaciones, (adim).

K : constante 0,52 para S.I. y 0,20 para I.P.

A : área de entrada de aire.

Luego se identificaron las tuberías y equipos pertenecientes al sistema de enfriamiento, a través de la revisión de los DTI e isométricos, para luego proceder a medir la velocidad de flujo de agua mediante un dispositivo portátil modelo HFM, como se ve en la Figura 3.2.



Figura 3.2 Medidor de flujo HFM

Fuente: <http://www.auroratechserv.com/prod01.htm> (s.f.)

De acuerdo con el manual de medidor de flujo HFM para el cálculo del flujo de agua indica en la ecuación 3.8.

$$Caudal = 2.45 * V * ID^2 \quad (3.8)$$

Donde:

Caudal: medido en galones por minuto (GPM)

V: velocidad del fluido (ft/s)

ID: diámetro interno de la tubería (plg)

Esta medición se realizó en las descargas de las bombas G-7157A/B/C para la torre M-7154, G-7160A/B/C para la torre M-7156 y G-955/956/957A para la torre E-951. Asimismo en cada torre se midió la velocidad de flujo de agua en el cabezal de entrada de agua caliente, salida de agua fría y en la línea de agua de reposición.

En los mismos puntos antes mencionados se midió la temperatura mediante un dispositivo portátil modelo FLUKE 66 ver (Figura 3.3), en el cual se debe ajustar la emisividad de acuerdo al material de la tubería y verificar el área de exploración.

Luego considerando el número de estaciones se procede a medir en campo los diferentes parámetros de procesos de las torres, tomando como referencia los procedimientos establecidos en el código Cooling Technology Institute. (2000). Acceptance Test Code for Water-Cooling Tower. (CTI Code ATC-105). Los parámetros medidos fueron temperatura de bulbo seco, humedad relativa, velocidad del viento y temperatura de rocío las cuales serán medidas con un anemómetro digital Extech Profesional ver (Figura 3.4). Luego a partir de los parámetros antes mencionados se determinó la temperatura de bulbo húmedo haciendo uso de una carta psicométrica.



Figura 3.3 Medidor de temperatura FLUKE 66



Figura 3.4 Anemómetro digital Extech

El voltaje requerido y amperaje consumido por los motores de los ventiladores se determinó por lectura directa de los equipos de medición, para determinar la potencia de cada ventilador a través de la ecuación 3.9 tomada del autor Mora J.,2003.

$$P = \sqrt{3} * V * I \quad (3.9)$$

en donde:

P: Potencia del ventilador, W.

V: Voltaje del ventilador, V.

I: Amperios del ventilador, A.

Finalmente los instrumentos utilizados para realizar la medición de variables se resumen en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2 Instrumentos de medición requeridas para la evaluación

Instrumento de medición	Variable
Medidor de Flujo (Hand Held Doppler) SERIE HFM	Velocidad del fluido (ft/s)
Medidor de Temperatura portátil modelo FLUKE 66	Temperatura (°F)
Manómetro	Presión (psi)
Anemómetro digital Extech	Temperatura de Bulbo Seco (°C)
Anemómetro digital Extech	Humedad Relativa (%)
Anemómetro digital Extech	Velocidad del Viento (MPH)
Anemómetro digital Extech	Temperatura de Rocío (°C)

3.2.2 Condiciones para la medición en campo

Se aplicaron las siguientes condiciones al momento de ejecutar las mediciones para la evaluación térmica evitando variaciones en las condiciones climatológicas y operacionales que afecten la toma de lecturas, mostradas a continuación:

- ✓ Duración de la prueba: 1 hora aproximada por torre.
- ✓ Orden de medición: una torre por día, (3 días de mediciones).
- ✓ Frecuencia de medición: las mediciones de velocidad del fluido y temperatura del agua se hicieron por duplicado en cada estación.
- ✓ Las unidades de la R.E.P. deben estar trabajando bajo condiciones normales de operación y las cargas a las diferentes plantas deben mantenerse en estado estacionario.
- ✓ Las bombas de circulación de agua en cada torre deben mantenerse en condiciones normales de operación. (G-7157A/B/C, G-7160A/B/C y G-955/956/957A).
- ✓ Sin nubosidad ni precipitaciones.
- ✓ Ejecución de mediciones en condiciones críticas (aprox. 12:00 m.).
- ✓ Llevar tablas para asentar los datos a medir en campo.

Para recolectar los datos se crearon una serie de tablas basado en el código Cooling Technology Institute. (2000). Acceptance Test Code for Water-Cooling Tower. (CTI Code ATC-105), con la finalidad de obtener resultados consistentes y coherentes en los parámetros que se buscan medir. Se verificó previamente a las mediciones en campo, en los puntos de mediciones tanto las condiciones de seguridad como la ergonomía del sitio de trabajo y asentar en dichas tablas cualquier salvedad que se presente en el momento de ejecutar dichas mediciones. Estas tablas se pueden visualizar en el APÉNDICE B.

Es importante mencionar que todas las mediciones realizadas son necesarias para determinar la capacidad térmica de enfriamiento en las tres

torres, dichas mediciones servirán como datos de inicio para realizar la evaluación térmica aplicando el método de curvas de comportamiento basado en el código Cooling Technology Institute. (2000). Acceptance Test Code for Water-Cooling Tower. (CTI Code ATC-105).

3.2.3 Método de curvas de comportamiento

Este método se utilizó para determinar la capacidad de enfriamiento de las torres E-951, M-7154 y M-7156 de la R.E.P. a las condiciones de diseño basado en el código Cooling Technology Institute. (2000). Acceptance Test Code for Water-Cooling Tower. (CTI Code ATC-105). Para dar continuidad se requieren al menos tres curvas de comportamiento por cada torre a diferentes capacidades por ejemplo (90%, 100% y 110%).

Las curvas de comportamiento son gráficas de la temperatura del agua fría (T_{cw}) en función de la temperatura de bulbo húmedo, para diferentes rangos de enfriamiento (Rango: $T_{hw} - T_{cw}$), las cuales fueron suministradas por el fabricante luego de la construcción de la torre.

Seguidamente, se requieren los siguientes datos de procesos:

- ✓ Flujo de agua que entra a la torre (Q_w), L/s.
- ✓ Temperaturas de agua caliente (T_{hw}), °C.
- ✓ Temperatura de agua fría (T_{cw}), °C.
- ✓ Temperatura de bulbo húmedo (T_{wb}), °C.
- ✓ Temperatura de bulbo seco (T_{db}), °C.
- ✓ Potencia del motor del ventilador, kW.
- ✓ Presión barométrica, kPa.
- ✓ Relación de gas-líquido (L/G).

Ahora bien se explicarán detalladamente los pasos a seguir para determinar la capacidad de enfriamiento.

Paso 1: Determinación de la temperatura de bulbo húmedo.

La temperatura de bulbo húmedo medido el día de las pruebas en campo es el primer dato operacional requerido por este método.

Paso 2: Determinación de las temperaturas predichas del agua fría.

Con T_{wb} , se traza una línea vertical en cada una de las curvas de comportamiento para determinar las temperaturas predichas del agua fría, como se observa en las Figuras 3.5, 3.6 y 3.7, mostradas a continuación:

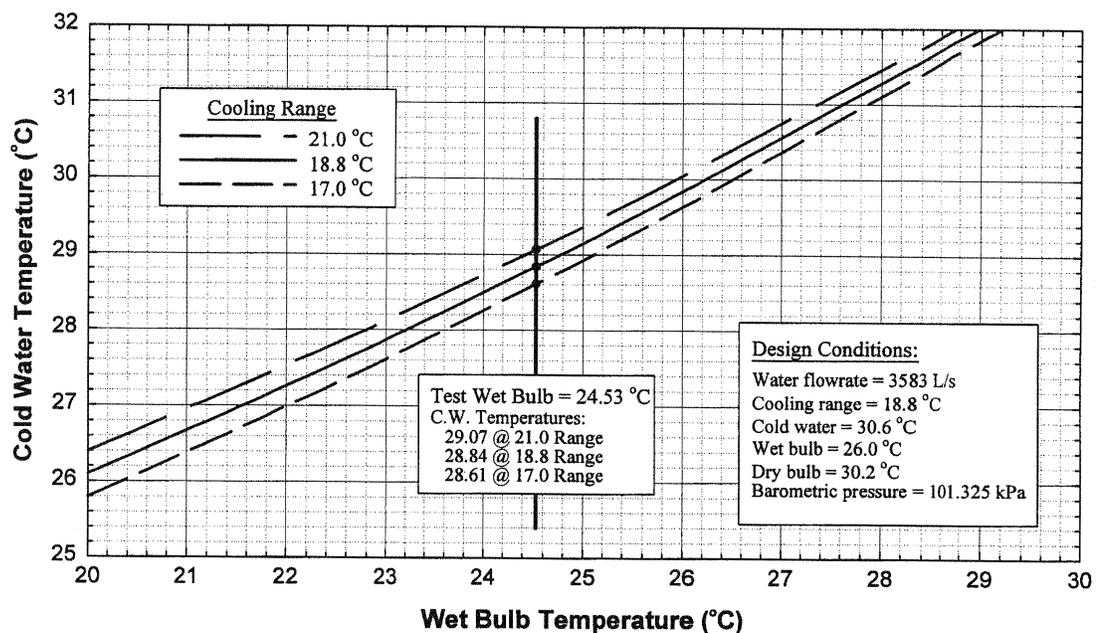


Figura 3.5 Curva de comportamiento para una capacidad del 90% (3225 L/s)

Fuente: Cooling Technology Institute, 2000

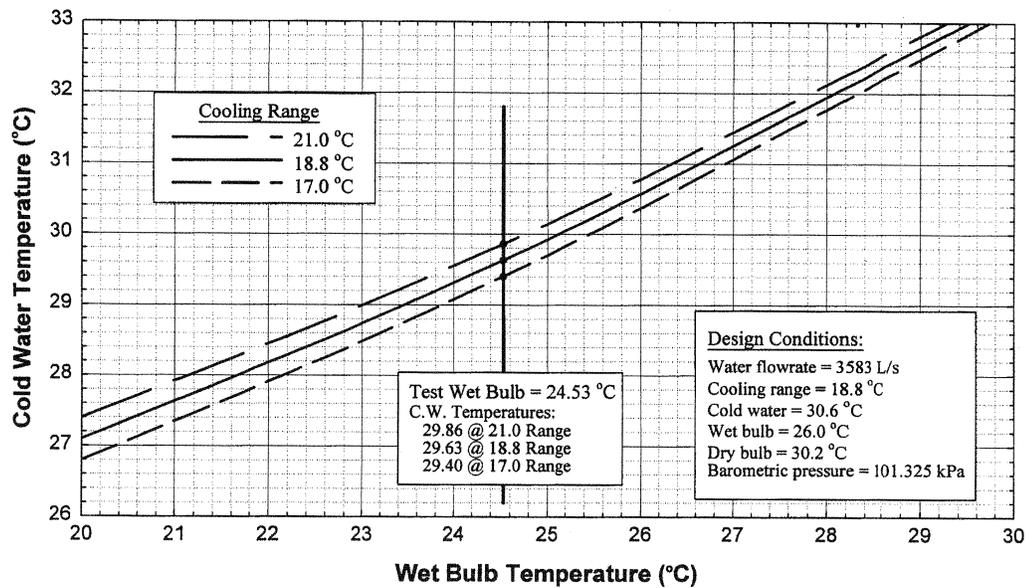


Figura 3.6 Curva de comportamiento para una capacidad del 100%(3583 L/s)

Fuente: Cooling Technology Institute, 2000

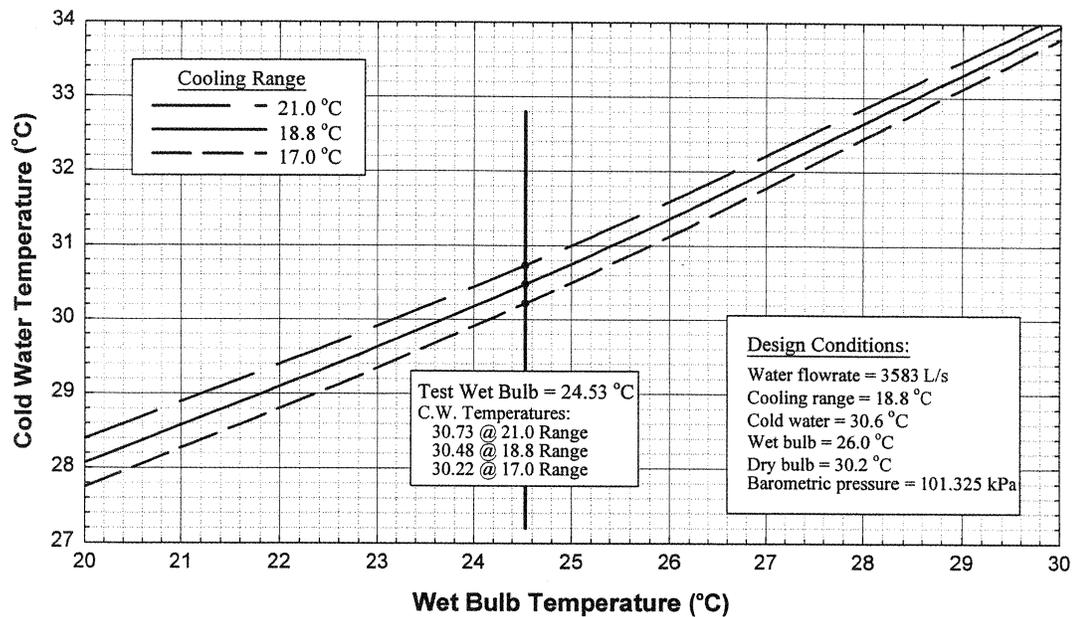


Figura 3.7 Curva de comportamiento para una capacidad del 110%(3942 L/s)

Fuente: Cooling Technology Institute, 2000

Se obtendrán tres temperaturas predichas de agua por cada curva de comportamiento, para nuestro caso sería un total de nueve temperaturas.

Paso 3: Determinación de las temperaturas predichas en función del rango de enfriamiento (range) para determinar las temperaturas del agua fría.

Según los valores determinados en el paso anterior se grafican las temperaturas predichas en función del rango de enfriamiento mostrado en la Figura 3.8.

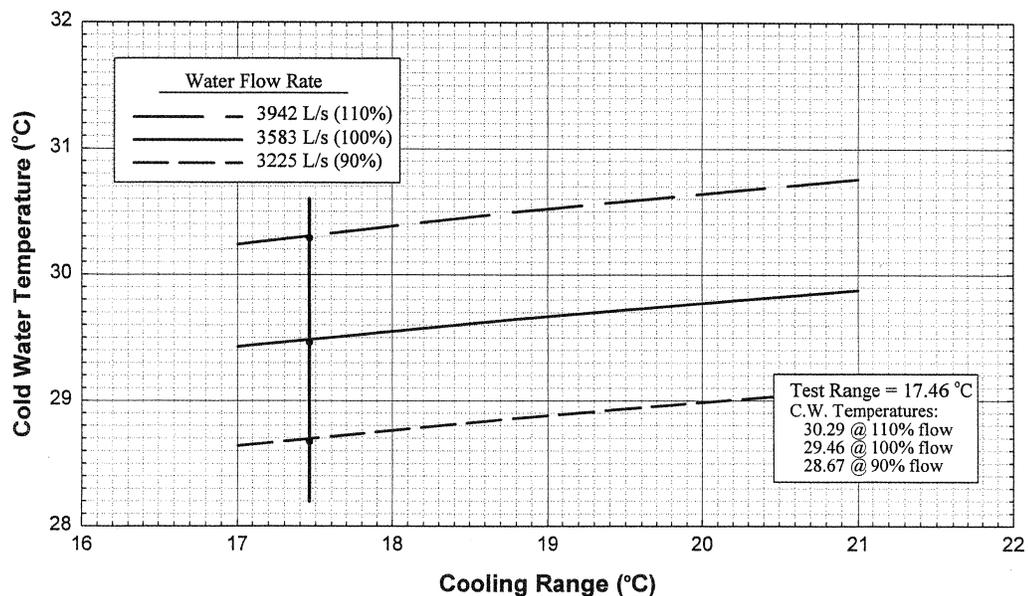


Figura 3.8 Temperaturas predichas en función del rango de enfriamiento

Fuente: Cooling Technology Institute, 2000

Para determinar las temperaturas de agua fría en función de la capacidad, se debe trazar una recta vertical con el valor del rango de enfriamiento determinado el día de las pruebas de planta. El rango de enfriamiento (R) es la diferencia entre la temperatura del agua caliente y el agua fría ($T_{hw} - T_{cw}$). Obteniendo tres temperaturas de agua fría según la capacidad.

Paso 4: Determinación de las temperaturas de agua fría en función del caudal de agua.

Con los valores obtenidos en el paso anterior, se grafica la curva de temperatura fría en función del caudal del agua, mostrado en la Figura 3.9.

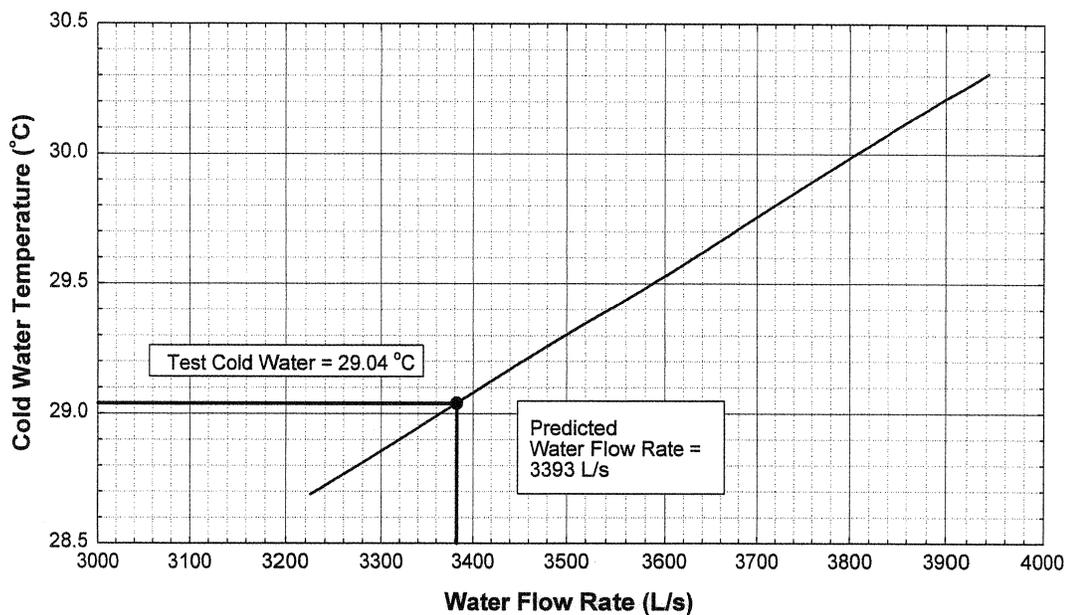


Figura 3.9 Temperaturas del agua fría en función del caudal de agua

Fuente: Cooling Technology Institute, 2000

Paso 5: Determinación el caudal de agua predicho (Q_{WPred}).

Con la temperatura del agua fría (T_{cw}) medida en el momento de la prueba, se traza una recta horizontal desde el eje de las ordenadas hasta cortar la curva y este punto se proyecta sobre el eje de las abscisas como se indica en la Figura 3.9. El valor del caudal leído en la gráfica representa el caudal de agua predicho (Q_{WPred}). Este valor representa el caudal de agua que debería estar circulando por la torre según las especificaciones del fabricante y según las temperaturas medidas de bulbo húmedo, agua caliente y fría.

Paso 6: Cálculo del caudal corregido de agua.

El caudal corregido de agua se obtiene por la siguiente ecuación tomada del código Cooling Technology Institute. (2000). Acceptance Test Code for Water-Cooling Tower. (CTI Code ATC-105), mostrado en la ecuación 3.10.

$$Q_{wtadj} = Q_{wt} \left(\frac{\dot{W}_d}{\dot{W}_t} \right)^{1/3} \left(\frac{\rho_t}{\rho_d} \right)^{1/3} \quad (3.10)$$

en donde:

Q_{wt} : Caudal de agua circulante medido en campo, L/s.

ρ : Densidad del aire a la salida de la torre, medida en campo (t) y diseño (d), kg/m^3

\dot{W} : Potencia del motor del ventilador, medida en campo (t) y diseño (d), kW.

Los valores tanto de la densidad (ρ_t) como del volumen específico (v_t) en m^3/kg y la entalpía del aire (h_{ot}) en kJ/kg a la salida de la torre durante la prueba deben ser determinados usando las tablas psicométricas, que se encuentran en el apéndice H del código Cooling Technology Institute. (2000). Acceptance Test Code for Water-Cooling Tower. (CTI Code ATC-105), o calculados usando la fórmula que se encuentra en el mismo apéndice.

Debido a que ésta evaluación está basada en propiedades psicométricas del aire a la entrada del ventilador, diferentes procedimientos deben ser empleados dependiendo del tipo de la torre (tiro forzado o tiro inducido); los cuales están especificados en el código Cooling Technology Institute. (2000). Acceptance Test Code for Water-Cooling Tower. (CTI Code ATC-105).

Para torres de enfriamiento de tiro inducido, el cálculo de las propiedades del aire a la salida de los ventiladores se realiza por medio del siguiente proceso iterativo:

- ✓ Suponer la temperatura del aire a la salida de la torre (T_a). Como primer estimado se puede tomar un promedio de la temperatura de agua fría y agua caliente.
- ✓ Asumiendo saturación del aire, determinar ρ_t , v_t y h_{ot} en tabla psicométrica.
- ✓ Con ρ_t , y v_t , determinar la relación L/G de la prueba $(L/G)_t$, tomada del código Cooling Technology Institute, 2000. *Acceptance Test Code for Water-Cooling Tower*. (CTI Code ATC-105), mostrada en la ecuación 3.11.

$$(L/G)_t = (L/G)_d * \left(\frac{Q_{wt}}{Q_{wd}} \right) * \left(\frac{\dot{W}_d}{\dot{W}_t} \right)^{\frac{1}{3}} * \left(\frac{\rho_t}{\rho_d} \right)^{\frac{1}{3}} * \left(\frac{v_t}{v_d} \right) \quad (3.11)$$

en donde:

L/G: Relación Líquido Gas, medida en campo (t) y de diseño (d).

Q_w : Caudal de agua circulante, medida en campo (t) y de diseño (d), L/s.

ρ : Densidad del aire, medida en campo (t) y de diseño (d), kg/m^3 .

\dot{W} : Potencia del motor del ventilador, medida en campo (t) y de diseño (d), kW.

v: Volumen específico del aire, medida en campo (t) y de diseño (d), m^3/kg .

- ✓ Calcular la entalpía del aire por medio de la siguiente ecuación tomada del código Cooling Technology Institute. (2000). Acceptance Test Code for Water-Cooling Tower. (CTI Code ATC-105), se expresa en la ecuación 3.12.

$$h_{ot} = (L/G)_t \cdot Cp_w \cdot (T_{hwd} - T_{cwd}) + h_{it} \quad (3.12)$$

donde:

Cp_w : capacidad calorífica del agua, $kJ/kg^{\circ}C$

T_{hw} : temperatura del agua caliente, $^{\circ}C$.

T_{cw} : temperatura del agua fría, $^{\circ}C$.

h_{it} : entalpía del aire a la entrada de la torre durante la prueba, la cual se obtiene por lectura directa en la carta psicométrica a la T_{wb} y la T_{bs} medidas durante la prueba, kJ/kg .

- ✓ Comparar el valor de h_{ot} calculado en el paso anterior con el valor leído en la tabla psicométrica. El proceso de iteración será culminado cuando estos dos valores sean considerablemente iguales; se acepta una desviación del 0.1%.
- ✓ Con los valores finales de ρ_t , y v_t se debe determinar el caudal de agua corregido por medio de la ecuación (VII).

Paso 7: Cálculo de la capacidad actual de la torre (C).

El cálculo de la capacidad de la torre se realiza mediante la siguiente ecuación tomada del código Cooling Technology Institute. (2000). Acceptance Test Code for Water-Cooling Tower. (CTI Code ATC-105), expresada en la ecuación 3.13.

$$C = \frac{Q_{Wtadj}}{Q_{Wpred}} \times 100 \quad (3.13)$$

Fase 3: Análisis de las deficiencias operacionales

Se analizaron las desviaciones operacionales que estarían afectando la capacidad térmica de las torres, inicialmente se construyó un Diagrama de Causa-Efecto el cual ayudó a visualizar las causas reales y potenciales que afectaron la capacidad de enfriamiento de cada torre en aras de analizar y comprender el origen del problema identificando posibles soluciones, toma de decisiones y organizar planes de acción.

Para construir dicho diagrama se identificó el problema que se quiere analizar. Éste se planteó de manera específica y concreta para que el análisis de las causas se oriente correctamente y evitando confusiones.

Una vez el problema se delimitó correctamente, se escribió con una frase corta y sencilla, en el recuadro principal o cabeza del pescado identificado como: “Baja capacidad térmica de las torres de enfriamiento”.

Luego se identificaron las principales categorías dentro de las cuales pueden clasificarse las causa del problema. Para identificar las categorías del diagrama Causa-Efecto, fue necesario definir los factores o agentes generales que dan origen a la situación, evento, fenómeno o problema que

se quiere analizar y que hacen que se presente de una manera determinada. Se asumió que todas las causas del problema que se identificaron, pueden clasificarse dentro de una u otra categoría.

Generalmente, la mejor estrategia para identificar la mayor cantidad de categorías posibles, fue realizar una lluvia de ideas con el equipo de trabajo. Cada categoría que se identificó fue ubicada independientemente en una de las espinas principales del pescado.

Seguidamente se puntualizaron las causas mediante una lluvia de ideas y teniendo en cuenta las categorías encontradas, se identificaron las diferentes causas del problema. Éstas son por lo general, aspectos específicos de cada una de las categorías que, al estar presentes de una u otra manera, generan el problema. Las causas identificadas fueron ubicadas en las espinas, que confluyen en las espinas principales del pescado.

También puede ocurrir que al realizar la lluvia de ideas resulte una causa del problema que no pueda clasificarse en ninguna de las categorías previamente identificadas. En este caso, es necesario generar una nueva categoría e identificar otras posibles causas del problema relacionadas con ésta.

Finalmente se analizó y discutió el diagrama con el personal de Ingeniería de Procesos de P.D.V.S.A. una vez que el diagrama causa-efecto fue finalizado, sin embargo existe la posibilidad de realizarle modificaciones. La discusión debe estar dirigida a identificar la(s) causa(s) más probable(s), y a generar, si es necesario, posibles planes de acción.

Luego de realizar y discutir el diagrama causa-efecto se realizó una inspección visual de las estructuras de cada torre como complemento de la evaluación térmica basado en un instrumento de inspección que sirvió para

evaluar los aspectos estructurales que influyen en el desempeño térmico, basado en el manual SPX COOLING TECHNOLOGIES, (2008). *Cooling Tower Inspection Tips*, complementando los puntos a inspeccionar mediante el manual SPX COOLING TECHNOLOGIES, (2009). *Torres de Enfriamiento–Marley Clase–W400*.

También se consultó con el personal técnico calificado de P.D.V.S.A. las principales partes de las torres que fueron inspeccionadas. Sobre la base de las consideraciones anteriores se diseñó el siguiente instrumento de inspección mostrado en la Tabla 3.3.

Como resultado de la aplicación de este instrumento y posterior análisis, se formalizó una reunión con el Gerente e Ingenieros de procesos de P.D.V.S.A., con el fin de presentar los resultados obtenidos en la medición e inspección de cada torre de enfriamiento.

Fase 4: Generación de alternativas que conlleven a incrementar la capacidad térmica

Se presentaron alternativas a través de una sesión de tormentas de ideas que conlleven a la mejora del sistema actual de enfriamiento. El desarrollo de estas alternativas, dependerá de la capacidad actual de enfriamiento de cada torre, sin embargo será necesario analizar todas estas alternativas sustentadas con la bibliografía concerniente con el diseño de torres de enfriamiento, además de la selección de equipos y/o accesorios según sea el caso.

El propósito de una sesión de tormenta de ideas es trabajar como grupo para identificar un problema, y hallar, a través de una intervención participativa, la mejor decisión de grupo para un plan de acción que mejore la capacidad térmica.

Para lograr dicha tormenta se eligió un coordinador, designado por el grupo de trabajo para dirigir la sesión de tormentas de ideas. Luego se definió el enunciado del tema de la tormenta de ideas, el cual se precisó con anterioridad a la realización de la sesión de trabajo.

Tabla 3.3 Modelo de lista de comprobación de inspección

LISTA DE COMPROBACIÓN DE INSPECCIÓN

Fecha de Inspección:	Inspeccionado por:
Propietario:	Tipo de diseño de la torre:
Fabricante de la torre:	Proceso servido por la torre:
TAG:	Año de instalación:

Condición: 1.Buena 2.Mantenerla vigilada 3.Necesita atención inmediata

Puntos a revisar en campo	1	2	3	Comentarios
Estructura de las torres				
Bombas				
Persianas (rejillas laterales)				
Relleno				
Eliminadores de rocío				
Boquillas de distribución				
Piscinas				
Presentan inyección de químicos (piscinas)				
Carcasa del ventilador				
Funcionamiento de los ventiladores				
Sistema de distribución de agua				
Información referente a la calidad del agua				

Seguidamente se realizó una introducción a la sesión, escribiendo el enunciado del tema de forma que sea visible a todos los participantes durante la sesión y se comentaron las reglas conceptuales de la tormenta de ideas tales como: el pensamiento debe ser creativo, no se admiten críticas ni explicaciones propias, los aportes se hicieron por turnos y se aportó solo una idea por turno.

Luego se estableció el turno a seguir señalando el participante que inició el proceso aportando las ideas por turno manteniendo presente las reglas conceptuales, cuando se llegó a un punto del desarrollo en que el volumen de ideas aportado decreció apreciablemente, se hizo una ordenación y lectura de dichas ideas.

La tormenta de ideas se finalizó cuando ningún participante tenía ideas que aportar. El resultado de la sesión fue una lista resumen de ideas que para su correcta interpretación, la lista de ideas duplicadas se eliminaron y se agruparon cada grupo de ideas por torre de enfriamiento.

Finalmente al finalizar la generación de alternativas se seleccionaron las alternativas más influyentes basadas en la experiencia de los expertos del área.

Fase 5: Desarrollo de la(s) alternativa(s) seleccionadas

Para el desarrollo de las alternativas seleccionadas y previamente analizadas con el personal de P.D.V.S.A. consideradas factibles, se inició mediante la sustitución del relleno en las torres M-7154 y M-7156 contabilizando el total de barras requeridas considerando dimensiones, modelo y tipo de material, luego con las especificaciones técnicas del material, a través del fabricante se ubicó la disponibilidad del relleno de acuerdo con el requerimiento de P.D.V.S.A.

De acuerdo con las deficiencias operacionales identificadas se creó un programa de inspección y mantenimiento para las torres de enfriamiento basado en el manual SPX COOLING TECHNOLOGIES, (2009). *Torres de Enfriamiento–Marley Clase–W400*. Para ello conocida las partes internas de una torre de enfriamiento se incluyó las rutinas de inspecciones, verificaciones y mantenimiento para las principales partes de las tres torres de enfriamiento.

Finalmente se analizaron y discutieron cada alternativa desarrollada con el personal calificado de P.D.V.S.A. para realizar una definición global para la estimación de costos clase V.

Fase 6: Presentación de un estimado de costo clase V

Para calcular el costo de inversión correspondiente a estas alternativas se realizó como primer paso un listado de equipos y/o partes a reemplazar, según sea el caso, luego se obtendrá los costos de aquellas recomendaciones que requieran modificaciones estructurales y/o sustitución de accesorios en las torres de enfriamiento basado en cotizaciones del fabricante o cualquier otra empresa relacionada con esta área.

Para la elaboración de estos estimados de costos se utilizaron las siguientes herramientas:

- ✓ Hojas de especificaciones de equipos y partes.
- ✓ Manual de estimaciones de costos clase V suministrado por P.D.V.S.A.
- ✓ Cotizaciones de fabricantes de rellenos para torres de enfriamiento por el fabricante C.E. Shepherd Company.
- ✓ Estimado de costos de envío bajo los términos comerciales internacionales de 2010 por el fabricante C.E. Shepherd Company.

- ✓ Costos de mano de obra para reemplazo de partes en torres de enfriamiento indicado por la empresa Amertech Tower Services, LLC.
- ✓ Estimaciones de datos históricos sobre costos de mantenimiento preventivo y correctivo en torres de enfriamiento por el fabricante Enercon Services, Inc.
- ✓ Estimaciones para inversión de plantas de productos químicos, polímeros y procesos de refinería por la consultora SRI CONSULTING.

Seguidamente se contabilizó el total de barras en cada torre de enfriamiento y se estimó el porcentaje de reemplazo a través de inspecciones visuales realizadas en campo. Asimismo se estimó la mano de obra para el reemplazo de las barras así como costo de envío estimando el costo total por barras requeridas para la sustitución del relleno en las torres de enfriamiento M-7154 y M-7156.

Luego se estimó el costo de mantenimiento preventivo y correctivo anual en torres de enfriamiento obteniendo una tabla resumen para totalizar los costos asociados a las alternativas desarrolladas en el período de un año.

Del mismo modo se estimó el costo total instalado (CTI) de las torres de enfriamiento, mediante correlaciones y curvas de fabricantes y proveedores de P.D.V.S.A. y consultoras que proporcionaron estimaciones de inversión de planta para una amplia gama de productos químicos, polímeros y procesos de refinería.

Posteriormente se calculó la diferencia de costos para las torres de enfriamiento E-951, M-7154 y M-7156 mediante la diferencia de costos entre la inversión asociada al mantenimiento preventivo y correctivo respecto a la inversión asociada al costo total instalado.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se analizan y discuten los resultados obtenidos en cada uno de los objetivos planteados.

4.1 DIAGNÓSTICO TÉRMICO DE LAS TORRES DE ENFRIAMIENTO DE LA R.E.P.

4.1.1 Preparación del procedimiento

Primeramente se comenzó por revisar la descripción de procesos del sistema de enfriamiento en conjunto con los Diagramas de Tubería e Instrumentación (D.T.I.) dando a conocer que la configuración de dicho sistema, es decir, se cuantificó los principales equipos que conforman el sistema de enfriamiento como son: torres de enfriamiento, bombas y válvulas de control. Asimismo, se identificó la red de tuberías asociada al sistema de enfriamiento como son: cabezales y sub-cabezales de distribución a través de los D.T.I. en conjunto con los Diagramas de Flujo de Procesos (D.P.F.). Posteriormente se identificó estos equipos a través de documentos como: Descripción de Procesos y Diagramas de ubicación de equipos (Plot Plans).

La información anterior dio a conocer que este sistema de enfriamiento está configurado por tres circuitos cerrados, cada uno con una torre sumando un total de tres (03) torres de enfriamiento del tipo Flujo Cruzado designadas como E-951, M-7154 y M-7156. La torre E-951 tiene la finalidad de retirar el calor del agua recirculada de la Unidad de Crudo y parte de Solventes, la torre M-7154 Unidades de Conversión y Tratamiento, Vacío, BTX, PTR, HDT y Planta Eléctrica. Finalmente la torre M-7156 funciona exclusivamente para la Unidad de Alquiler para impedir la contaminación del resto de las áreas con ácido sulfúrico.

En la preparación del procedimiento para ingresar a campo fue imprescindible revisar el código Acceptance Test Code for Water-Cooling Tower, Cooling Tower Institute, (CTI Code ATC-105), para ello se estableció una serie de actividades que conllevó a la evaluación térmica de las torres de enfriamiento de la R.E.P. de acuerdo con la Tabla 3.1. Este procedimiento se pudo ejecutar aproximadamente en una hora por cada torre de enfriamiento alrededor de las 12:00 a.m. garantizando las mismas condiciones en las mediciones realizadas en campo.

4.1.2 Mediciones obtenidas en las torres de enfriamiento

Como parte del diagnóstico de las torres de enfriamiento fue necesario ingresar a campo para la recolección de datos mediante una serie de tablas basado en el código Acceptance Test Code for Water-Cooling Tower, Cooling Tower Institute, (CTI Code ATC-105). Para obtener estos datos se midieron en campo a la hora más crítica del día, es decir, cercano a las 12:00 m. garantizando la condición mínima de enfriamiento en cada una de las torres. Estas mediciones (ver APÉNDICE B) se realizaron a una torre por día, cercano a la misma hora crítica antes mencionada tratando de garantizar las mismas condiciones ambientales. A continuación se muestran los resultados promedios obtenidos en las torres E-951, M-7154 y M.7156 (ver Tablas 4.2 al 4.4).

Respecto al flujo de agua caliente resultó menor que el flujo medido de agua fría debido a limitaciones del equipo de medición (Hand Held Doppler - SERIE HFM) ya que las mediciones realizadas en las tuberías de agua fría, la pintura había sido removida en los puntos de medición realizados en trabajos anteriores. Y para este trabajo teníamos restricciones en remover dicha pintura en los cabezales de agua caliente. Los caudales de agua se determinaron mediante la ecuación 3.8 (ver capítulo III).

Tabla 4.2 Resultados obtenidos en la torre de enfriamiento E-951

Parámetros	Unidades	Resultados
Flujo de agua fría	GPM	7.711 ± 0,8
Flujo de agua caliente	GPM	3.258 ± 0,8
Pérdidas totales	GPM	350,2 ± 0,4
Temperatura de agua fría	°F	95,8 ± 0,1
Temperatura de agua caliente	°F	121,1 ± 0,1
Temperatura de bulbo húmedo a la entrada	°F	82,5 ± 0,1
Temperatura de bulbo seco a la entrada	°F	85,3 ± 0,1
Temperatura de rocío	°F	81,5 ± 0,1
Humedad relativa a la entrada	%	89 ± 1
Rango	°F	25,3 ± 0,2
Acercamiento	°F	13,3 ± 0,2
Potencia total del motor-ventilador	BHP	240,71 ± 0,01
Porcentaje de efectividad	%	65,54 ± 0,01

Para analizar las temperaturas de agua fría, agua caliente y de bulbo húmedo, se determinó el porcentaje de efectividad, el cual se puede cuantificar como el cociente del alcance real ($Rango = 25,3 \text{ }^{\circ}\text{F}$) entre el rango ideal ($T_{HW} - T_{WB} = 38,6 \text{ }^{\circ}\text{F}$), para la torre E-951 el porcentaje de efectividad fue de 65,54 %, esto quiere decir que la torre podría tener un mejor funcionamiento ya que para un rango de 25,3 °F, posee una temperatura de agua caliente distante de la temperatura de bulbo húmedo, esto significa que la torre no ha sido capaz de disminuir la temperatura con eficacia (Goyal J., 2012), trayendo como consecuencia una baja capacidad térmica.

Respecto al valor de acercamiento ($13,3\text{ }^{\circ}\text{F}$), este representa un mejor indicador del funcionamiento de la torre de enfriamiento el cual posee un valor ligeramente alto esto es debido a que al determinar la diferencia de temperatura de salida del agua fría y la temperatura de bulbo húmedo ambos valores están ligeramente distantes. Según (Goyal J., 2012), indica que cuanto menor sea el acercamiento mejor será el rendimiento de la torre de enfriamiento. Asimismo, la humedad relativa esta cercano al 90 % lo que evidencia una temperatura de bulbo húmedo alta, siendo esta temperatura ligeramente menor a la temperatura de bulbo seco, esto se le atribuye al estado del aire se cercano a la condición de saturación.

Tabla 4.3 Resultados obtenidos en la torre de enfriamiento M-7154

Parámetros	Unidades	Resultados
Flujo de agua fría	GPM	$54.296 \pm 0,8$
Flujo de agua caliente	GPM	$48.951 \pm 0,8$
Pérdidas totales	GPM	$823,4 \pm 0,4$
Temperatura de agua fría	$^{\circ}\text{F}$	$101,7 \pm 0,1$
Temperatura de agua caliente	$^{\circ}\text{F}$	$116,5 \pm 0,1$
Temperatura de bulbo húmedo a la entrada	$^{\circ}\text{F}$	$81,5 \pm 0,1$
Temperatura de bulbo seco a la entrada	$^{\circ}\text{F}$	$89,3 \pm 0,1$
Temperatura de rocío	$^{\circ}\text{F}$	$26,2 \pm 0,1$
Humedad relativa a la entrada	%	73 ± 1
Rango	$^{\circ}\text{F}$	$14,8 \pm 0,2$
Acercamiento	$^{\circ}\text{F}$	$20,2 \pm 0,2$
Potencia total del motor-ventilador	BHP	$1.035,93 \pm 0,01$
Porcentaje de efectividad	%	$42,29 \pm 0,01$

El comportamiento de las tres torres fueron relativamente similares sin embargo el porcentaje de efectividad más alto fue el de la torre M-7156 con un valor igual a 78,57 % (ver Tabla 4.4) seguido de la torre E-951 con 65,54 % (ver Tabla 4.2) y el valor más bajo fue de la torre M-7154 con 42,29 % (ver Tabla 4.3), estos porcentajes dependen tanto del acercamiento como el rango de enfriamiento, es por ello que en la torre M-7156 obtuvo el acercamiento más bajo con 6,6 °F; esto se le atribuye a valor de temperatura de salida de la torre que está ligeramente cercano a la temperatura de bulbo húmedo obteniendo un mejor rendimiento de la torre.

Tabla 4.4 Resultados obtenidos en la torre de enfriamiento M-7156

Parámetros	Unidades	Resultados
Flujo de agua fría	GPM	12.949 ± 0,8
Flujo de agua caliente	GPM	2.315 ± 0,8
Pérdidas totales	GPM	83,8 ± 0,4
Temperatura de agua fría	°F	87,6 ± 0,1
Temperatura de agua caliente	°F	111,8 ± 0,1
Temperatura de bulbo húmedo a la entrada	°F	81,0 ± 0,1
Temperatura de bulbo seco a la entrada	°F	32,6 ± 0,1
Temperatura de rocío	°F	25,6 ± 0,1
Humedad relativa a la entrada	%	67 ± 1
Rango	°F	24,2 ± 0,2
Acercamiento	°F	6,6 ± 0,2
Potencia total del motor-ventilador	BHP	260,89 ± 0,01
Porcentaje de efectividad	%	78,57 ± 0,01

De acuerdo con los porcentajes de efectividad obtenidos en cada una de las torres de enfriamiento reflejan que difieren del 100 %. Según Sirena, J.A. (2010), resalta que torres con problemas de enfriamiento deriva del funcionamiento de la torre fuera de las condiciones de diseño, probablemente inducido por: obstrucciones en la torre, suciedades en el relleno, etc. Sin

embargo de acuerdo con las sugerencias del personal técnico calificado del área se recomienda realizar inspecciones visuales en cada torre de enfriamiento, para investigar si existen desviaciones operacionales relacionadas con la infraestructura, diseño y operación de la torre así como la calidad del agua.

Para la determinación de las pérdidas totales del sistema de enfriamiento de la R.E.P. se utilizó el caudal de entrada a las torres, las cuales están asociadas a las pérdidas por evaporación, fricción, efectos del viento, purga y fugas de agua, en el cual el valor más alto de pérdidas fue calculado en la torre de enfriamiento M-7154 con un valor igual 823,4 GPM seguido de la torre E-951 y M-7156 con valores de 350,2 GPM y 83,8 GPM respectivamente estas pérdidas influyen en la capacidad de enfriamiento, las más afectadas fueron las torres de enfriamiento E-951 y M-7154.

4.2 DETERMINACIÓN LA CAPACIDAD DE ENFRIAMIENTO DE CADA UNA DE LAS TORRES DE LA R.E.P.

4.2.1. Selección del procedimiento de evaluación

Existen dos métodos para determinar la capacidad actual de enfriamiento, de acuerdo con el código Cooling Technology Institute. (2000). Acceptance Test Code for Water-Cooling Tower. (CTI Code ATC-105). El primer método se refiere a las “Curvas de comportamiento” que se utiliza cuando el fabricante proporciona las condiciones de operación al 90 %, 100 % y 110 % del flujo de agua de circulación, y el segundo método “Curvas características por el criterio de Merkel” que se utiliza cuando no se cuenta con las curvas de comportamiento y se utiliza una curva característica auxiliar así como de valores de diseño: relación líquido-gas (L/G) y relación característica de la torre ($Ka V/L$).

Para seleccionar el procedimiento de evaluación, se eligió el método de curvas de comportamiento suministradas por P.D.V.S.A. Las curvas mostradas a continuación son concernientes con las torres de enfriamiento E-951, M-7154 y M-7156 al 110% de sus capacidades (ver Figuras 4.1, 4.2 y 4.3).

Al comparar las diferentes curvas de comportamiento para una misma torre de enfriamiento con distintos porcentajes de capacidad, se observó que para diferentes caudales se mantiene el rango de enfriamiento, esta condición ocurre en las tres torres de enfriamiento (ver APÉNDICE D), lo que evidencia que las torres fueron diseñadas para mantener una alta eficiencia en el proceso de enfriamiento.

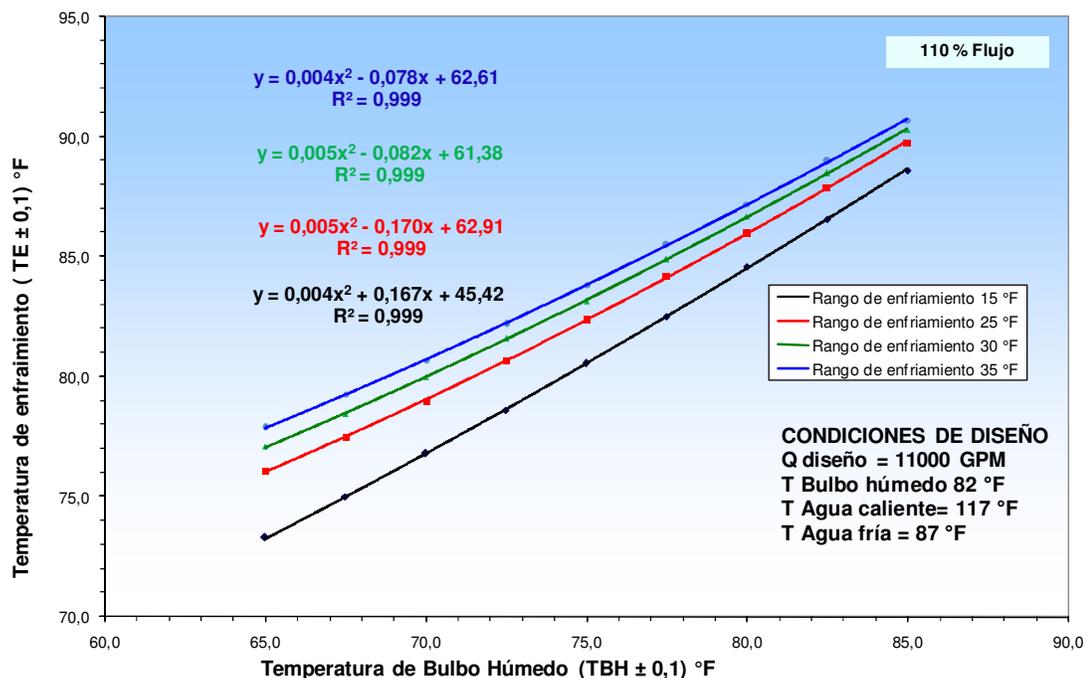


Figura 4.1 Curva de comportamiento de la torre E-951 al 110% de su capacidad

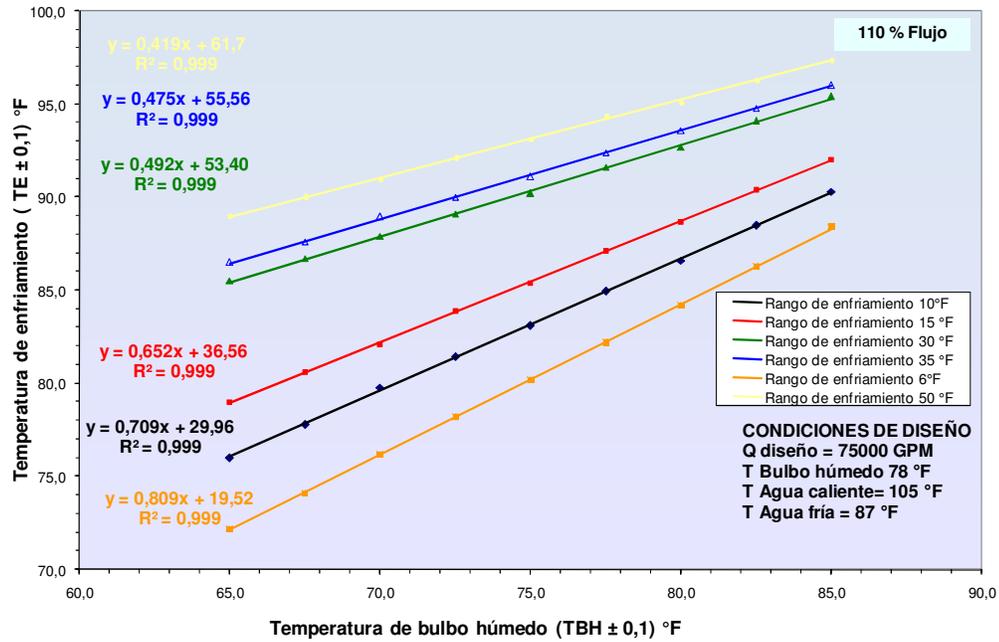


Figura 4.2 Curva de comportamiento de la torre M-7154 al 110% de su capacidad

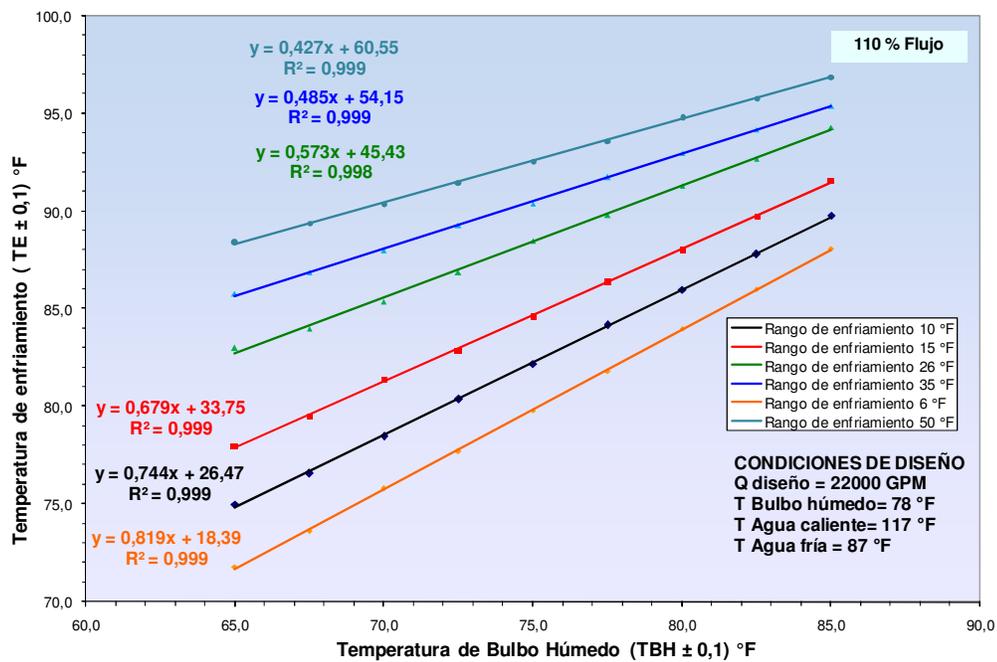


Figura 4.3 Curva de comportamiento de la torre M-7156 al 110% de su capacidad

Para los restantes porcentajes de capacidad de cada una de las torres se podrán apreciar en el APÉNDICE D (ver Figura D.1 a la Figura D.6), estas curvas de comportamiento son gráficas de temperatura de agua fría en función de la temperatura de bulbo húmedo y los diferentes rangos de enfriamientos.

4.2.2 Validación de los datos de diseño

Para la validación de los datos de diseño suministrados por PDVSA, se determinó el calor retirado (Q_P), por el agua de enfriamiento en las torres E-951, M-7154 y M-7156, utilizando los datos de diseño y posteriormente cada calor determinado se comparó con el valor de calor disipado de los fabricantes.

Para determinación del calor retirado se tomó el sistema de enfriamiento mostrado en la Figura 4.4, en el cual se establecieron dos volúmenes de control denotados como VC1 y VC2.

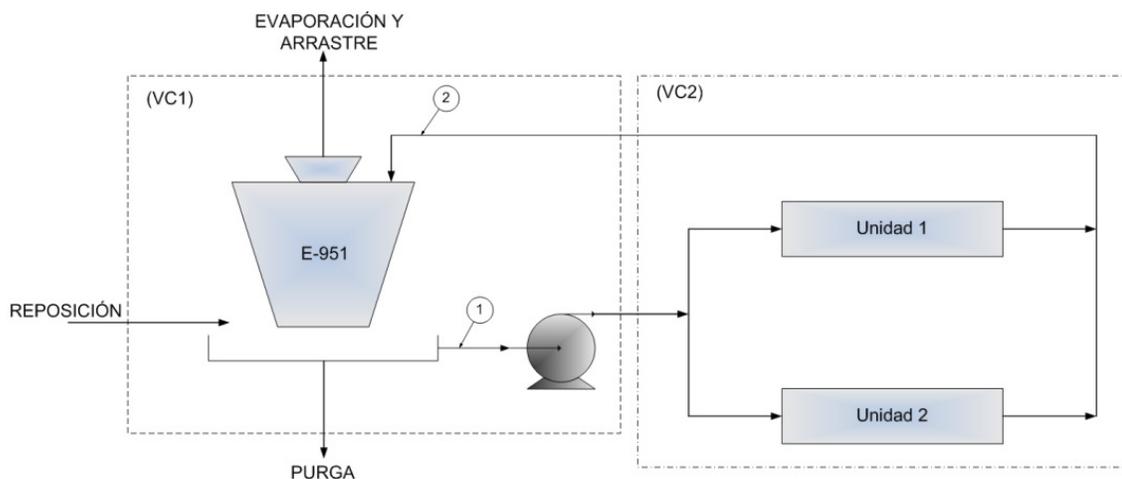


Figura 4.4 Volúmenes de control seleccionados en el sistema de enfriamiento

Seguidamente se aplicó un balance de energía en el VC2 y considerando que las pérdidas de agua son despreciables empleamos la ecuación 3.6 (ver capítulo III) y sustituyendo los datos del fabricante de las torres de enfriamiento E-951, M-7154 y M-7156 el calor retirado obtenido se mostró en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5 Calor retirado en las diferentes torres de enfriamiento de la R.E.P.

E-951 (MMBTU/h)	M-7154 (MMBTU/h)	M-7156 (MMBTU/h)
165,07	675,30	330,15

Al comparar dichos valores de calor se observó que el valor más alto corresponde a la torre de enfriamiento M-7154 esto se le atribuye a que dicha torre fue diseñada para manejar un mayor caudal respecto a las otras dos torres (ver condiciones de diseño en la Figura 4.3). Asimismo se determinó el porcentaje de desviación respecto al calor de diseño con la finalidad de certificar los datos de diseño del fabricante suministrado por P.D.V.S.A. en el cual se resume en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6 Porcentaje de desviación del calor retirado en las torres de enfriamiento

Torre de Enfriamiento	Calor retirado (MMBTU/h)	Calor de Diseño (MMBTU/h)	% Desviación
E-951	165,07	165	0,04
M-7154	675,30	675	0,04
M-7156	330,15	330	0,05

Luego al determinar los porcentajes de desviación se comparó el calor retirado respecto al calor retirado de diseño observando que no existe diferencia apreciable entre ambos, evidenciando que los datos de diseño suministrado por el fabricante de cada una de las torres son confiables para el determinar la capacidad de enfriamiento de las torres E-951, M-7154 y M-7156.

Del mismo modo aplicando la ecuación 3.6 (ver capítulo III) y sustituyendo los datos actuales de operación se determinó el calor retirado actual (ver Tabla 4.7) y al comparar con el calor de diseño se observó que todos los porcentajes de desviación están cercanos alrededor del 50% lo que evidencia que existen factores asociados a la infraestructura, diseño y operación de la torre que disminuyen la capacidad de enfriamiento en cada una de las torres.

De acuerdo con lo antes expuesto procedemos a determinar la capacidad de enfriamiento para las torres de enfriamiento E-951, M-7154 y M-7156.

Tabla 4.7 Porcentaje de desviación del calor retirado actual en las torres de enfriamiento

Torre de Enfriamiento	Calor actual (MMBTU/h)	Calor de Diseño (MMBTU/h)	% Desviación
E-951	97,59	165	40,86
M-7154	401,97	675	40,45
M-7156	156,75	330	52,50

4.2.3 Determinación de la capacidad actual de enfriamiento de cada torre

Para determinar la capacidad de enfriamiento, se inició con la revisión de planos concernientes de dimensiones generales y disposición de tuberías, obteniendo las dimensiones del área de entrada de aire para cada torre mostrado en la Tabla 4.8.

Tabla 4.8 Área de entrada de aire en las torres de enfriamiento

Torre de enfriamiento	Área de entrada de aire (m ²)
E-951	279,3
M-7154	731,3
M-7156	284,2

Al determinar las diferentes áreas de entrada de aire estas arrojaron que la mayor entrada corresponde a la torre de enfriamiento M-7154 la cual requiere una mayor eficiencia de enfriamiento ya que está diseñada para retirar una mayor cantidad de calor (ver Tabla 4.5). Posteriormente se determinó el número mínimo de estaciones, es decir, el número de puntos de mediciones, según el APÉNDICE G del código (ATC-105), siendo necesario utilizar los diferentes modelos de tablas para asentar las mediciones de campo. (Ver Tablas B.1 al B.10 APÉNDICE B), basado en el código Acceptance Test Code for Water-Cooling Tower, Cooling Tower Institute, (CTI Code ATC-105), con la finalidad de obtener resultados consistentes y coherentes en los parámetros que se buscan medir.

Para determinar el número mínimo de estaciones se utilizó la ecuación 3.7 (ver capítulo III), luego sustituyendo los valores de las áreas de la Tabla 4.8 se tiene el siguiente número mínimo de estaciones mostrado en la Tabla 4.9.

Tabla 4.9 Número de estaciones de cada torre de enfriamiento

Torre de enfriamiento	Número mínimo de estaciones
E-951	5
M-7154	7
M-7156	5

Es importante resaltar que este número de estaciones es concerniente para una sola área de entrada de aire, sin embargo para la evaluación actual, cada torre tiene dos entradas de aire, por consiguiente el número total de estaciones para las torres E-951, M-7154 y M-7156 son diez (10), catorce (14) y diez (10) respectivamente.

Para la torre de enfriamiento E-951 se obtuvo el día de las pruebas una temperatura de bulbo húmedo (T_{wb}), igual a 82.5 °F al interceptar dicho valor (línea vertical) con cada una de las curvas de comportamiento se determinó las temperaturas predichas del agua fría, mostrado en la Tabla 4.10.

Tabla 4.10 Temperaturas predichas mediante las curvas de comportamiento

Rango de Enfriamiento (°F)	90% Flujo Diseño (°F)	100% Flujo Diseño (°F)	110% Flujo Diseño (°F)
15	85,05	85,82	86,49
25	86,46	87,01	87,65
30	87,18	87,53	88,62
35	87,59	88,25	88,84

Al graficar el rango de enfriamiento de la torre E-951 e interceptando con las rectas generadas mediante las temperaturas predichas para los diferentes porcentajes de flujo de diseño, conseguimos en la Figura 4.5.

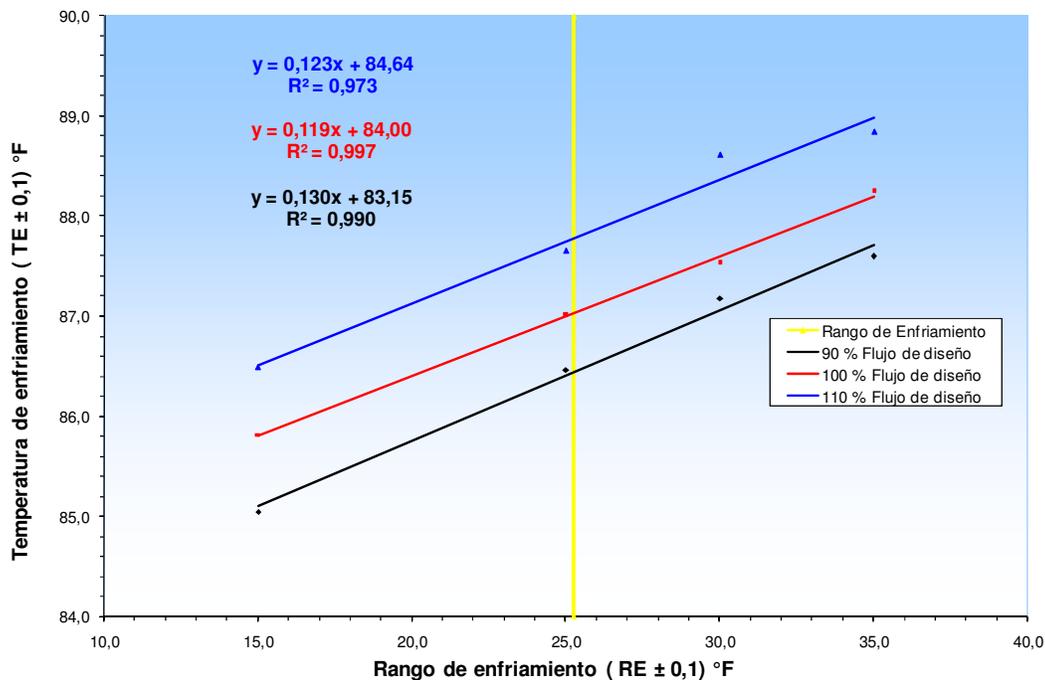


Figura 4.5 Temperaturas predichas en función del rango de enfriamiento de la torre E-951

Los interceptos de la Figura 4.5 representan las temperaturas de agua fría los cuales se muestra en la Tabla 4.11.

Tabla 4.11 Temperaturas de agua fría para la torre E-951 según la capacidad

90% de capacidad	100% de capacidad	110% de capacidad
86,44 °F	87,44 °F	87,77 °F

Con los valores presentados en la Tabla 4.11, se grafica la temperatura de agua fría en función del flujo de circulación al 90%, 100% y 110%, adicionalmente se graficó la temperatura de agua fría de la torre E-951 medida en campo como se muestra a continuación (ver Figura 4.6):

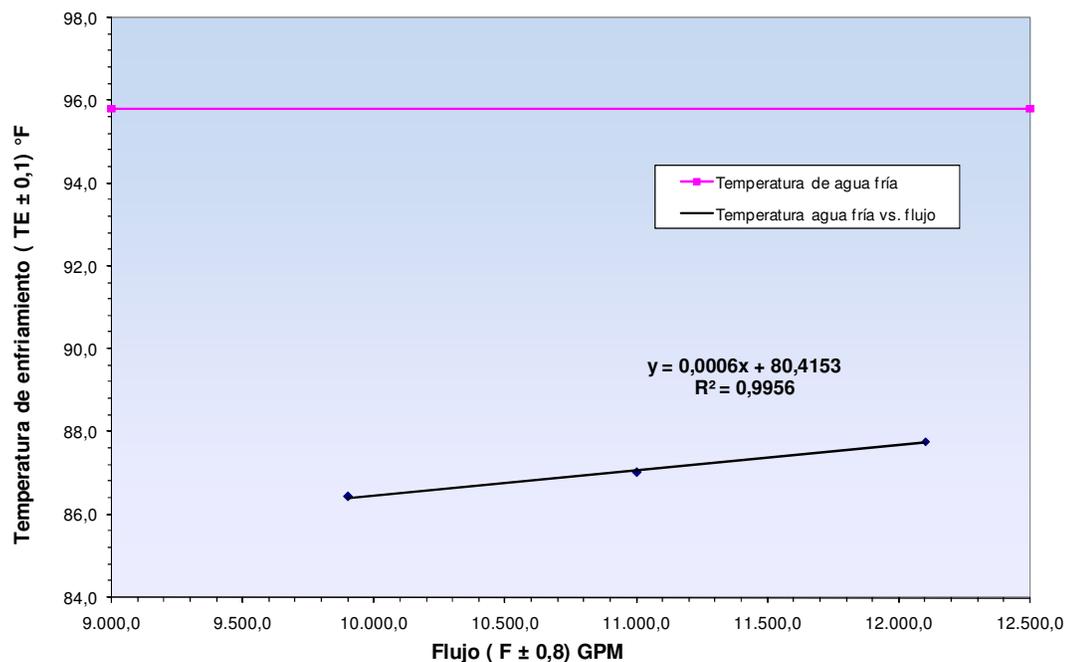


Figura 4.6 Temperaturas de agua fría en función del caudal de la torre E-951

El intercepto entre estas dos rectas proyectado sobre el eje x, representa el caudal predicho el cual fue $Q_{WPred} = 25.387$ GPM. (ver paso 5, Capítulo III).

Para el cálculo del caudal corregido de agua (Q_{wadj}), partimos de un proceso iterativo especificado en el código Cooling Technology Institute, 2000. *Acceptance Test Code for Water-Cooling Tower*. (CTI Code ATC-105), para determinar las propiedades psicrométricas del aire a la entrada de los ventiladores para torres de tiro inducido, para ello seleccionamos la

temperatura del aire a la salida de la torre (T_a) con un valor igual a $T_a = 93,7751715834499 \text{ } ^\circ\text{F} \approx 93,8 \text{ } ^\circ\text{F}$, lo que permite cerrar el ciclo iterativo, mostrado en la Tabla 4.12.

Tabla 4.12 Resultados obtenidos como producto del proceso iterativo para determinar las propiedades del aire en la torre E-951

Parámetro	Unidad	Torre E-951
Temperatura del aire (T_a)	$^\circ\text{F}$	93,8
Densidad del aire (ρ_t)	lb/ft^3	0,07
Volumen específico del aire (v_t)	ft^3/lb	14,75
Entalpía del aire (h_{ot}) (Tabla)	Btu/lb	61,45
Entalpía del aire (h_{ot}) (calculado)	Btu/lb	61,45
Porcentaje de desviación (%)	%	0

Utilizando estos valores con la ecuación (3.9) dan como resultado utilizando un $Q_{wadj} = 7.401 \text{ GPM}$. Finalmente utilizando la ecuación (3.12) determinamos la capacidad actual (C) de la torre E-951, arrojando un valor igual a:

$$C = 29,2 \%$$

Lo que indica que la torre E-951 es capaz de enfriar 3.212 GPM de agua para un flujo de diseño de 11000 GPM desde la temperatura de agua caliente de diseño (117 $^\circ\text{F}$) hasta la temperatura de agua fría de diseño (87 $^\circ\text{F}$) hasta la temperatura de de bulbo húmedo de diseño (82 $^\circ\text{F}$) con una potencia total del motor ventilador de los ventiladores de (209 BHP).

Este mismo procedimiento se aplicó para las torres de enfriamiento M-7154 y M-7156, por consiguiente se mostrarán las tablas y gráficas concernientes a las temperaturas predichas y de agua fría en el en el APÉNDICE E.

A manera de resumen final se mostrarán los resultados de las capacidades determinadas para las torres de enfriamiento mostrada en la Tabla 4.13.

Tabla 4.13 Resultados requeridos para determinar la capacidad de las torres de enfriamiento

Parámetro	Unidad	Torre E-951	Torre M-7154	Torre M-7156
Temperatura del aire (T_a)	$^{\circ}\text{F}$	93,8	92,7	92,1
Densidad del aire (ρ_t)	lb/ft^3	0,07	0,07	0,07
Volumen específico del aire (v_t)	ft^3/lb	14,75	14,69	14,66
Entalpía del aire (h_{ot})	Btu/lb	61,45	59,87	58,92
Caudal predicho de agua (Q_{WPred})	GPM	25.387	154.441	15.786
Caudal corregido de agua (Q_{wadj})	GPM	7.401	57.930	13.644
Capacidad (C)	%	29,2	37,5	86,4

Al comparar los tres porcentajes de capacidad se puede apreciar que para las torres E-951 y M-7156 presentan valores ciertamente bajos constatando que presentan deficiencias asociados a la infraestructura, diseño y operación. Sin embargo para la torre M-7156 se presentan dichas deficiencias en menor proporción.

Luego de conocer la baja capacidad térmica en cada una de las torres es necesario identificar y analizar las causas potenciales que proporcionan este

bajo rendimiento, por consiguiente resulta oportuno aplicar una herramienta conocida como diagrama causa-efecto o diagrama de Ishikawa.

4.3 ANÁLISIS LAS DEFICIENCIAS OPERACIONALES QUE AFECTEN LA CAPACIDAD TÉRMICA DE LAS TORRES DE ENFRIAMIENTO

Luego de conocer el proceso de enfriamiento instalado en la R.E.P. se construyó un diagrama de causa-efecto el cual facilitará la identificación de posibles causas que afecten la capacidad térmica facilitando el análisis del problema y búsqueda de soluciones.

En la Figura 4.7 se muestra el diagrama causa-efecto o diagrama de Ishikawa para el problema identificado como: baja capacidad térmica de las torres de enfriamiento.

De acuerdo con este diagrama podemos observar posibles factores o agentes generales que dan origen al problema principal, como son: infraestructura, operación, diseño y calidad del agua. Asimismo se identificaron posibles causas del problema antes mencionado.

Luego de generar dicho diagrama se mostró y analizó en conjunto con el personal de P.D.V.S.A. el cual se reforzó mediante las opiniones del personal relacionado con las actividades de mantenimiento permitiendo focalizar las posibles causas que estarían afectando la capacidad térmica de las torres de enfriamiento.

Para establecer las variables más influyentes se realizó un análisis por cada rama principal para descartar las variables que no afectarían dicha capacidad, simplificando dicho diagrama.

Después de lo antes expuesto, para la infraestructura se analizó como posible causa la carencia de relleno, el cual tiene objetivo incrementar el

tiempo de contacto entre el agua y el aire aumentando la transferencia de calor. Este elemento si se encuentra ausente en secciones de la torre por deterioro del mismo, desalineado, con presencia de incrustaciones o película bacteriana, esto traerá como consecuencia un incremento tanto en el consumo de la energía eléctrica como del agua reduciendo la capacidad de enfriamiento.

Se estudió los eliminadores de rocío como posible causa, si existen secciones rotas, dobladas o faltantes estarán operando inadecuadamente observándose una lluvia constante alrededor de la torre, ocasionando una reducción en la capacidad de enfriamiento y pérdidas de agua por arrastre.

Finalmente para el análisis de la infraestructura se consideraron las persianas, las cuales se utilizan en las torres para conducir el aire hacia el interior de una forma eficiente, si éstas no están presentes, se afecta la distribución interna del aire ocasionando pérdidas de agua debida a la acción del viento afectando la capacidad de enfriamiento.

Para analizar la operación en las torres de enfriamiento se consideró las temperaturas elevadas de agua fría, como consecuencia de secciones faltantes o deterioradas del relleno y la obstrucción de los distribuidores de agua ubicados en la piscina superior de agua caliente. Estas causas antes expuestas influyen negativamente reduciendo en tiempo de contacto entre el agua y el aire dentro de las torres mermando la capacidad de enfriamiento.

Asimismo se consideró la operatividad de los ventiladores axiales ya que mantienen la dirección del aire antes y después de su paso por el mismo originando una correcta transferencia de calor hacia el aire garantizando el enfriamiento del agua.

Ahora bien si estos ventiladores se encuentran fuera de servicio o que las aspas estén desniveladas, es decir, el paso del aspa con respecto al cilindro que las protege existan secciones donde aumenta o disminuya la separación, esto se traduce en una disminución de la capacidad de enfriamiento.

Posteriormente para el análisis de operación en las torre de enfriamiento se consideró la distribución deficiente de agua, esta puede ser ocasionada por un limitado caudal de agua como consecuencia de alguna válvula que se encuentre cerrada y no deba estarlo o la obstrucción de los distribuidores de agua ubicados en la piscina superior de agua caliente.

Para estudiar el diseño en las torres de enfriamiento se consideró si realmente el diseño actual está afectando la capacidad de enfriamiento para ello se consideraron revisar las especificaciones técnicas de los siguientes elementos como son los distribuidores de agua, tipo de relleno y los ventiladores. La capacidad de enfriamiento de una torre es una combinación de todos estos elementos involucrados tanto en el diseño como en la selección de los mismos.

Con referencia a la calidad de agua, esta tiene una influencia en la eficiencia global del sistema de enfriamiento tanto en el nivel de los mantenimientos requeridos como en la vida útil de todos los componentes de la torre.

El agua de enfriamiento de baja calidad ocasiona incrustaciones para medir la tendencia en la que precipita el carbonato de calcio del agua con las condiciones dadas de contenido de calcio, alcalinidad, pH y sólidos disueltos totales se utiliza el Índice de Langelier.

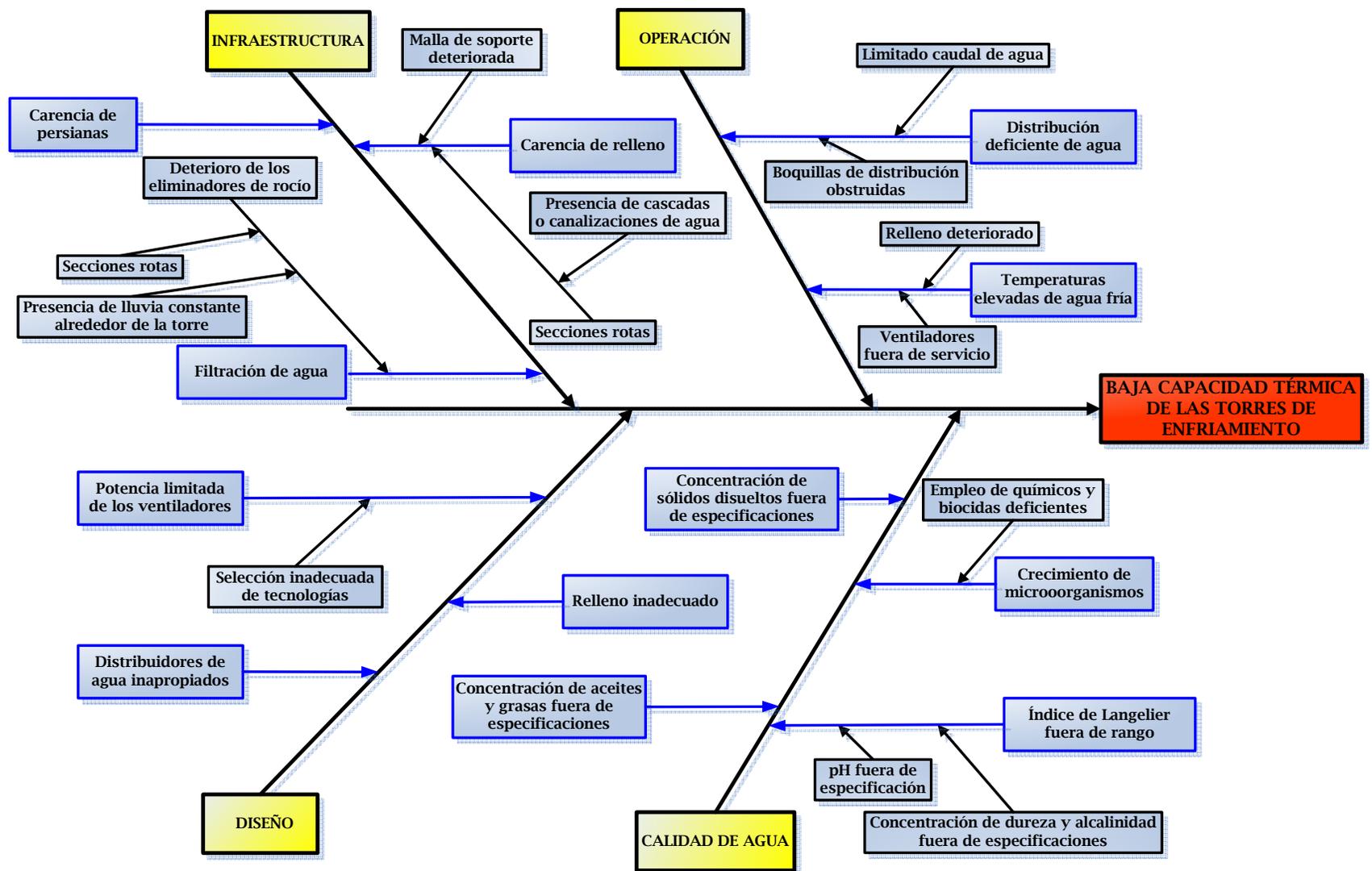


Figura 4.7 Diagrama de Ishikawa concerniente a la baja capacidad térmica de las torres de enfriamiento de la R.E.P.

Con respecto a las concentraciones de aceite y grasas, se deben controlar ya que pueden afectar el rendimiento de las torres al encontrarse en altas concentraciones.

Con respecto al crecimiento microbiano estos forman una biopelícula en las superficies de las partes internas y externas de las torres si no se cuenta con un eficiente sistema dosificador de biocidas eficaces compatibles y sinérgicos entre sí.

En el caso de una torre de madera se debe tener especial cuidado con los microorganismos que se alimentan de la madera, ya que pueden destruirla fácilmente.

De los análisis anteriores se presenta a continuación el nuevo diagrama de Ishikawa simplificado considerando las variables más influyentes, que estarían afectando verdaderamente la capacidad de enfriamiento en las tres torres de enfriamiento. A continuación se mostrará el diagrama de Ishikawa en la Figura 4.8.

Sobre la base de las consideraciones anteriores se realizó una inspección visual de las estructuras de cada torre con la finalidad de dilucidar las verdaderas causas que estarían afectando la capacidad térmica mediante el diseño del siguiente instrumento basado en los manuales para inspección de torres de enfriamiento SPX COOLING TECHNOLOGIES, (2008). *Cooling Tower Inspection Tips*, complementando los puntos a inspeccionar mediante el manual SPX COOLING TECHNOLOGIES, (2009). *Torres de Enfriamiento—Marley Clase—W400*. Mostrando los siguientes resultados:

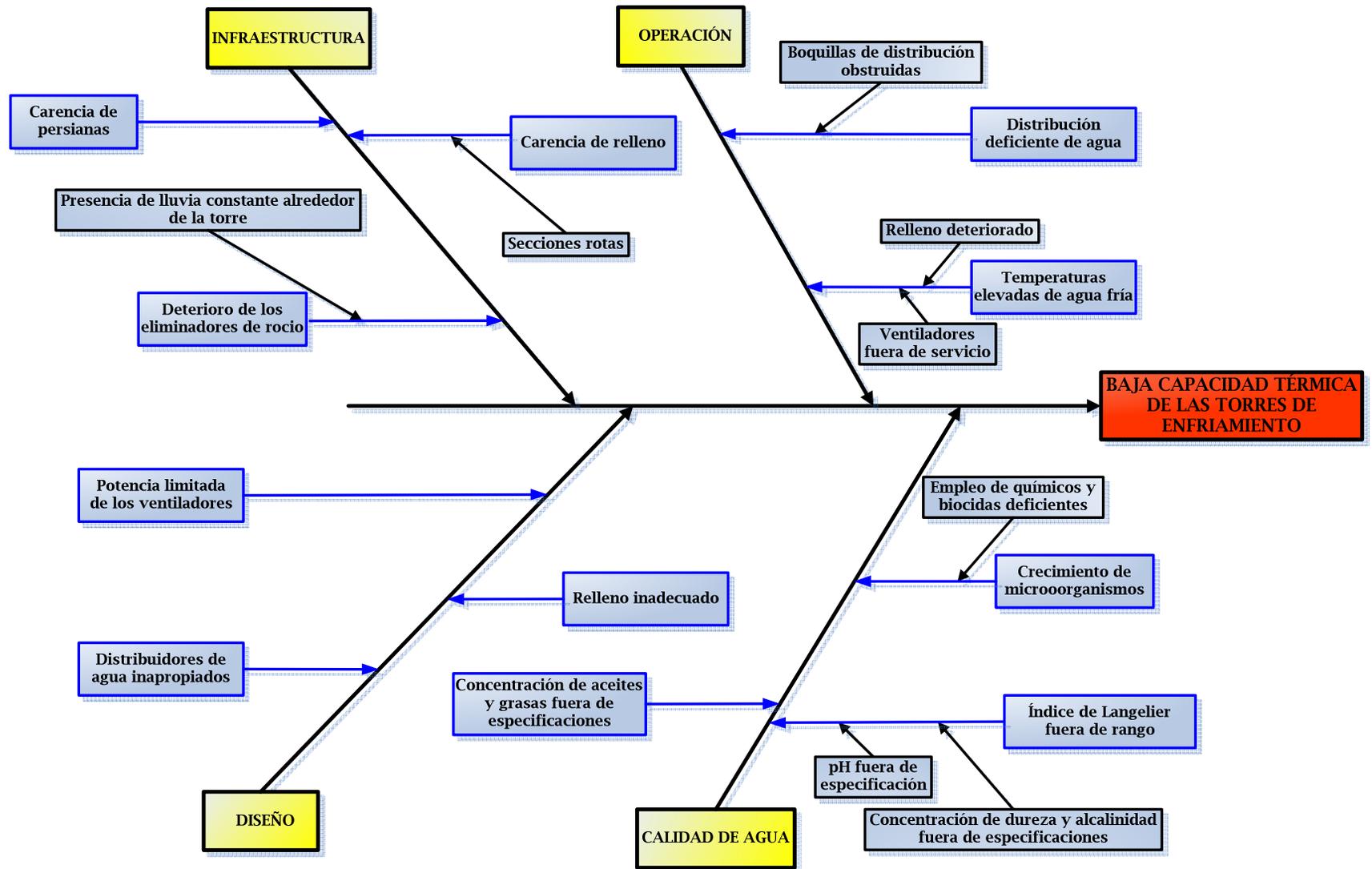


Figura 4.8 Diagrama simplificado de Ishikawa concerniente a la baja capacidad térmica de las torres de enfriamiento de la R.E.P.

LISTA DE COMPROBACIÓN DE INSPECCIÓN

Fecha de Inspección: Mayo-2011	Inspeccionado por: ING JESÚS GONZÁLEZ
Propietario: P.D.V.S.A.	Tipo de diseño de la torre: TIRO INDUCIDO, FLUJO CRUZADO.
Fabricante de la torre: SOCONY MOBIL OIL Co. DE VENEZUELA C.A.	Proceso servido por la torre: Unidad de Crudo y Solventes.
TAG: E-951	Año de instalación: 1960

Condición: 1.Buena 2.Mantenerla vigilada 3.Necesita atención inmediata

Puntos a revisar en campo	1	2	3	Comentarios
Estructura de las torres		X		Presenta filtraciones en las paredes laterales ocasionando crecimiento microbiano.
Bombas	X			Las bombas G-956 y G-957A se encuentran en servicio. Una bomba de respaldo.
Persianas (rejillas laterales)			X	Presenta crecimiento microbiano.
Relleno			X	Presenta fuerte crecimiento microbiano en todo el relleno de madera.
Eliminadores de rocío		X		No se pudo inspeccionar por hermeticidad de la torre.
Boquillas de distribución		X		No se pudo inspeccionar por hermeticidad de la torre.
Piscinas			X	Agua oscura, turbia, con presencia de una ligera capa de espuma en sectores de la piscina de agua fría.
Presentan inyección de químicos (piscinas)		X		Se realiza bajo la consultora NALCO VENEZUELA C.A.
Carcasa del ventilador	X			Condiciones normales, pintura deteriorada.
Funcionamiento de los ventiladores			X	Vibraciones en los ventiladores.
Sistema de distribución de agua	X			Se observó uniformidad en la distribución de agua.
Información referente a la calidad del agua			X	Se encontró valores de Aceites y Grasas fuera de especificaciones (mayor a 10ppm). El Índice de Langelier (IL) se encontró superior a 0.5, valor máximo permisible. El valor de pH se encontró superior a 8ppm, valor máximo permisible. (*)

(*) Nota: Los valores son reportados diariamente por el laboratorio de R.E.P.

LISTA DE COMPROBACIÓN DE INSPECCIÓN

Fecha de Inspección: Mayo-2011	Inspeccionado por: ING JESÚS GONZÁLEZ
Propietario: P.D.V.S.A.	Tipo de diseño de la torre: TIRO INDUCIDO, FLUJO CRUZADO.
Fabricante de la torre: RALPEN / INDEIN	Proceso servido por la torre: Unidades de Conversión y tratamiento, Vacío, BTX, PTR, HDT y Planta Eléctrica.
TAG: M-7154	Año de instalación: 1979

Condición: 1.Buena 2.Mantenerla vigilada 3.Necesita atención inmediata

Puntos a revisar en campo	1	2	3	Comentarios
Estructura de las torres		X		Secciones de paredes están removidas, presenta crecimiento microbiano.
Bombas	X			Se encuentra las tres bombas operativas.
Persianas (rejillas laterales)	X			Es buen estado, cambiadas recientemente.
Relleno			X	Presenta fuerte crecimiento microbiano, se encontró secciones deterioradas y con falta de relleno.
Eliminadores de rocío			X	Alta presencia de crecimiento microbiano.
Boquillas de distribución		X		No se pudo inspeccionar por presentar alto nivel de agua en la piscina.
Piscinas			X	Agua oscura, turbia, con presencia de alta de espuma en sectores de la piscina de agua fría y agua caliente. En esta última piscina presenta desbordamiento de agua y presencia de lodos.
Presentan inyección de químicos (piscinas)		X		Se realiza bajo la consultora NALCO VENEZUELA C.A.
Carcasa del ventilador			X	Falta de secciones en la carcasa del ventilador M-7154A. Pintura deteriorada.
Funcionamiento de los ventiladores			X	Se encontró el ventilador M-7154C fuera de servicio. Cinco ventiladores en servicio.
Sistema de distribución de agua			X	Se presentan cascadas o canalizaciones de agua en ciertas zonas.
Información referente a la calidad del agua			X	Se encontró valores de Aceites y Grasas fuera de especificaciones (mayor a 10ppm). El Índice de Langelier (IL) se encontró superior a 0.5, valor máximo permisible. El valor de pH se encontró superior a 8, valor máximo permisible. (*)

(*) Nota: Los valores son reportados diariamente por el laboratorio de R.E.P.

LISTA DE COMPROBACIÓN DE INSPECCIÓN

Fecha de Inspección: Mayo-2011	Inspeccionado por: ING JESÚS GONZÁLEZ
Propietario: P.D.V.S.A.	Tipo de diseño de la torre: TIRO INDUCIDO, FLUJO CRUZADO.
Fabricante de la torre: RALPEN / INDEIN	Proceso servido por la torre: Unidad de Alquiler.
TAG: M-7156	Año de instalación: 1979

Condición: 1.Buena 2.Mantenerla vigilada 3.Necesita atención inmediata

Puntos a revisar en campo	1	2	3	Comentarios
Estructura de las torres		X		Secciones de las paredes presentan fisuras con crecimiento microbiano.
Bombas	X			Se encuentra dos bombas operativas (M-7156A/B)
Persianas (rejillas laterales)	X			Presencia de crecimiento microbiano.
Relleno			X	Presenta fuerte crecimiento microbiano, se encontró secciones deterioradas, con falta de relleno y desalineadas.
Eliminadores de rocío			X	Alta presencia de crecimiento microbiano.
Boquillas de distribución		X		No se pudo inspeccionar por hermeticidad de la torre.
Piscinas			X	Agua oscura, turbia, con presencia leve de espuma en sectores de la piscina de agua fría y agua caliente. En esta última piscina presenta alta formación de lodo.
Presentan inyección de químicos (piscinas)		X		Se realiza bajo la consultora NALCO VENEZUELA C.A.
Carcasa del ventilador			X	Falta de secciones en la carcasa de los ventiladores M-7156A/B. Pintura deteriorada. Presenta aberturas entre las uniones de las partes de la carcasa.
Funcionamiento de los ventiladores			X	Todos los ventiladores se encontraron operativos, los soportes de los ventiladores se encuentran oxidados. Presentan vibraciones.
Sistema de distribución de agua			X	Se observó formaciones de leves cascadas, en algunas zonas.
Información referente a la calidad del agua			X	Se encontró el Índice de Langelier (IL) se encontró superior a 0.5, valor máximo permisible. El valor de pH se encontró superior a 8, valor máximo permisible. (*)

(*) Nota: Los valores son reportados diariamente por el laboratorio de R.E.P.

Como resultado de la inspección realizada en campo es conveniente resaltar los resultados físico-químico suministrados por el laboratorio de la R.E.P. mostrados en la Tabla 4.14.

Tabla 4.14 Resultados promedio de análisis físico-químico del agua de enfriamiento de las tres torres

Parámetro	Unidad	Torre E-951	Torre M-7154	Torre M-7156	* Límite permisible
Aceites y grasas	ppm	16,34	118	10,1	10 ppm máx
pH	-	8,54	9,30	9,42	(6,5 - 8,0)
Índice de Langelier	-	1,70	1,52	1,68	(-0,5 - +0,5)

* Fuente: Ludwing, 1997.

En relación a los valores de aceites y grasas en las torres E-951, M-7154 y M-7156 se obtuvo un promedio de 16,34 ppm, 118 ppm y 10,1 ppm respectivamente los cuales están fuera de especificaciones, según American Water Works Association. (2002), destaca que los aceites y grasas son originados por las corrientes de agua que contienen aceites lubricantes, asimismo pudiera estar asociado también a fugas de hidrocarburos en las tuberías de los intercambiadores de calor, los cuales estarían interfiriendo con el tratamiento químico que se realizan en el agua que circula a través de las torres de enfriamiento. Asimismo Ludwing Ernests, E. (1997), destaca que los valores de aceites y grasas por encima de 10 ppm causan pérdidas notables en el rendimiento térmico.

Con respecto a los valores promedio de pH para las torres E-951, M-7154 y M-7156 fueron igual a 8,54, 9,30 y 9,42 respectivamente los cuales están fuera de especificaciones, según American Water Works Association. (2002), menciona que un aumento de pH reportados en la Tabla 4.14 promueve la

disolución de los materiales a base de cemento y al lixiviado de sus componentes sin cal, adicionalmente reduce el poder de desinfección y calidad de estética del agua, así como la efectividad de los productos inhibidores de corrosión tipo fosfatos dispuesto para controlar la corrosión metálica. Asimismo con altos valores de pH la forma predominante son los carbonatos (CO_3^{-2}) lo que favorece la precipitación del Ca^{2+} y Mg^{2+} en forma de carbonatos de calcio y magnesio respectivamente, con la consecuencia de formación de incrustaciones, que con el tiempo favorecerá la adhesión de los microorganismos y desarrollo de biopelículas.

Finalmente respecto al índice de Langelier (LI) los valores promedio para las torres E-951, M-7154 y M-7156 fueron igual a 1,70, 1,52 y 1,68 respectivamente los cuales están fuera de especificaciones, según American Water Works Association. (2002), el agua está sobresaturada y tiene a precipitar una capa de incrustación de carbonato de calcio (CO_3Ca), estas incrustaciones pueden causar una deficiente distribución del agua tanto de las tuberías como en las boquillas de distribución del tope de la torre reduciendo el tiempo de contacto agua aire para llevar a cabo el enfriamiento. Asimismo, estas incrustaciones se adhieren a las superficies tanto de los eliminadores de rocío como del relleno de las torres, haciendo las veces de aislante disminuyendo la velocidad de transferencia de calor.

Luego de realizar la inspección en campo con el instrumento antes expuesto se muestra la siguiente lista de causas que están afectando la capacidad térmica expuesta a continuación:

4.3.1 Desviaciones encontradas en la torre E-951

- ✓ Filtraciones y crecimiento microbiano en paredes laterales.
- ✓ Crecimiento microbiano en las persianas o rejillas laterales.

- ✓ Crecimiento microbiano en todo el relleno de madera.
- ✓ Los eliminadores de rocío no pudieron inspeccionarse por la hermeticidad de la torre, sin embargo se presume que estos también estén altamente contaminados con la presencia de microorganismos.
- ✓ Se encontró los siguientes resultados físico-químico fuera de los límites recomendados: Aceites y Grasas, Índice de Langelier y pH.
- ✓ La piscina de agua fría presento agua oscura, turbia, con presencia de una ligera capa de espuma en sectores de la piscina de agua fría.

4.3.2 Desviaciones encontradas en la torre M-7154

- ✓ Secciones de paredes están removidas.
- ✓ Relleno deteriorado, removido y con crecimiento microbiano.
- ✓ Eliminadores de rocío con deterioro y alta presencia de crecimiento microbiano.
- ✓ Boquillas de distribución no pudieron inspeccionarse por la altura de nivel del agua, sin embargo se presume que estos estén altamente cubiertos de lodos.
- ✓ El ventilador M-7154A se encontró fuera de servicio, por desperfectos mecánicos además de tener en su carcasa zonas removidas y deterioradas.
- ✓ Se visualizó canalizaciones internas de agua.
- ✓ Se encontró los siguientes resultados físico-químico fuera de los límites recomendados: Aceites y Grasas, Índice de Langelier y pH.

- ✓ La piscina de agua fría y caliente presento agua oscura, turbia y con presencia de alta de espuma en algunos sectores. Asimismo la piscina de agua caliente presento desbordamiento de agua y presencia de lodos.

4.3.3 Desviaciones encontradas en la torre M-7156

- ✓ Se encontró secciones deterioradas con crecimiento microbiano.
- ✓ Las persianas presentaron crecimiento microbiano.
- ✓ Relleno deteriorado, removido y con crecimiento microbiano.
- ✓ Eliminadores de rocío con presencia microbiana.
- ✓ Los boquitas de distribución no pudieron inspeccionarse por la hermeticidad de la torre, sin embargo se presume que estos también estén altamente contaminados con la presencia de microorganismos.
- ✓ La piscina de agua fría y caliente presento agua oscura, turbia, con presencia de alta de espuma en sectores. Asimismo la piscina de agua caliente presento presencia de lodos.
- ✓ Presento algunas fisuras en las carcasas de los ventiladores M-7156A/B.

Finalmente luego de obtener las causas que están afectando la capacidad térmica procederemos mediante una herramienta de trabajo conocida como *"tormenta de ideas"*, que nos favorecerá a la generación de alternativas que conlleven a incrementar dicha capacidad.

4.4 GENERACIÓN DE ALTERNATIVAS QUE CONLLEVEN A INCREMENTAR LA CAPACIDAD TÉRMICA Y VIDA ÚTIL DE LAS TORRES DE ENFRIAMIENTO

Para comenzar a utilizar esta herramienta de trabajo grupal partimos de una idea principal que fue “*Generar las alternativas que conlleven al incremento de la capacidad de térmicas y vida útil de cada una de las torres de enfriamiento E-951, M-7154 y M-7156*”, el cual se captaron varias alternativas sin despreciar alguna de estas. Asimismo dichas alternativas se organizaron, ajustaron y revisaron hasta obtener las siguientes acciones mostradas a continuación:

4.4.1 Alternativas para la torre E-951

- ✓ Corregir filtraciones de las paredes laterales.
- ✓ Efectuar limpieza de las persianas.
- ✓ Realizar limpieza correctiva y preventiva de todo el relleno.
- ✓ Realizar limpieza correctiva de eliminadores de rocío.
- ✓ Realizar mantenimiento correctivo de limpieza en las boquillas de distribución de agua que se encuentran en el tope de la torre.
- ✓ Realizar limpieza correctiva y preventiva de las persianas laterales.
- ✓ Reforzar bases de los ventiladores.
- ✓ Ajustar aplicación de biocidas.
- ✓ Crear un programa de mantenimiento de la torre.

4.4.2 Alternativas para la torre M-7154

- ✓ Realizar sellado de secciones en las paredes laterales.
- ✓ Sustituir relleno deteriorado de la torre; aproximadamente el 90% del relleno debe ser reemplazado.

- ✓ Realizar limpieza correctiva de eliminadores de rocío.
- ✓ Realizar mantenimiento correctivo de limpieza en las boquillas de distribución de agua que se encuentran en el tope de la torre.
- ✓ Realizar inspección y mantenimiento del ventilador M-7154A con su respectivo análisis de vibración y balanceo.
- ✓ Realizar limpieza de la piscina de agua caliente.
- ✓ Ajustar aplicación de biocidas.
- ✓ Crear un programa de mantenimiento de la torre.

4.4.3 Alternativas para la torre M-7156

- ✓ Realizar sellado de secciones en las paredes laterales.
- ✓ Sustituir relleno deteriorado de la torre; aproximadamente el 20% del relleno debe ser reemplazado, el restante se debe realizar limpieza correctiva.
- ✓ Realizar limpieza correctiva de eliminadores de rocío.
- ✓ Realizar mantenimiento correctivo de limpieza en las boquillas de distribución de agua que se encuentran en el tope de la torre.
- ✓ Realizar sellado de secciones en las carcasas de los ventiladores M-7156A/B
- ✓ Realizar limpieza de la piscina de agua caliente.
- ✓ Ajustar aplicación de biocidas.
- ✓ Crear un programa de mantenimiento de la torre.

De acuerdo con las alternativas generadas, se seleccionó primeramente el reemplazo del relleno en las torres de enfriamiento M-7154 y M-7156, basado

en la experiencia de los expertos en el área, los cuales indican que el componente más influyente en la capacidad de enfriamiento en dichas torres el relleno, ya que de encontrarse deteriorado reducirá la capacidad de enfriamiento desde un 30 % hasta 40 % (DRB Cooling Towers, 2011). El relleno es una de las partes más susceptibles a la suciedad y al crecimiento biológico ya que el desarrollo de cualquiera de estos problemas disminuirá en gran medida la eficacia de la capacidad de enfriamiento y en casos severos hasta puede colapsar partes del relleno o incluso la estructura de la torre. (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2011).

Finalmente la segunda alternativa seleccionada se refiere a la implementación de un plan de mantenimiento como parte del mejoramiento de la capacidad de enfriamiento en las torres E-951, M-7154 y M-7156. Según el manual SPX COOLING TECHNOLOGIES, (2009) *Torres de Enfriamiento–Marley Clase–W400*. menciona que las torres que tengan un buen mantenimiento darán mejores resultados en su funcionamiento, disminuyendo los costos asociados al mantenimiento. Por tal motivo se recomienda una programación de inspecciones regulares para garantizar un funcionamiento efectivo y seguro de las torres de enfriamiento.

Por todas las razones antes expuestas en las torres de enfriamiento E-951, M-7154 y M-7156 se incluyó la realización de limpiezas correctivas de: distribuidores de agua, eliminadores de rocío, piscinas de agua caliente, relleno y persianas laterales. Asimismo se incluyó en dicho plan la inspección y/o reparación de: los ventiladores, así como de sus bases y carcasas protectoras. Significa entonces que un mantenimiento adecuado es de vital importancia para el rendimiento térmico del sistema de enfriamiento ya que estaremos utilizando los mínimos recursos tanto de agua como de energía.

4.5 DESARROLLO DE LAS ALTERNATIVAS SELECCIONADAS CON EL FIN DE MEJORAR LA CAPACIDAD DE ENFRIAMIENTO DE LAS TORRES

Sobre la base de las alternativas anteriores existen dos alternativas que mejoran notoriamente la capacidad de enfriamiento mostradas a continuación:

4.5.1 Sustitución del Relleno en las torres M-7154 y M-7156

Para el reemplazo del relleno en las torres M-7154 y M-7156, se calculó el total de barras considerando dimensiones, modelo y tipo de material. Para la M-7154 se estimó un total de 601.350 barras, las cuales se encuentran disponibles por el fabricante “C. E. Shepherd Company” (ver APÉNDICE F). Dichas barras presentan una alta calidad de PVC extrusionado usado comúnmente en torres de enfriamiento de flujo cruzado diseñados para una máxima eficiencia (ver Figura 4.9), las especificaciones técnicas se muestran en la Tabla 4.15. Del mismo modo se estimó para la torre M-7156 un total de 6.609 barras, con las mismas características y del mismo fabricante mostrado en la Tabla 4.15.

Tabla 4.15 Características de barra para reemplazar en las torres

M-7154 y M-7156

Modelo de barra	Material	Ancho (plg)	Longitud (pie)
Gull Wing	Alta calidad de PVC extrusionado	4	6

Es necesario el cambio de este relleno deteriorado para las torres M-7154 y M-7156 ya que obtendremos un mayor tiempo de contacto entre el agua y el aire. Favoreciendo la presencia de extensas superficies húmedas mediante gotas y finas películas de agua. Además tendremos mejores resultados en la transmisión de calor brindando poca resistencia al paso del aire y manteniendo una distribución uniforme tanto del agua como del aire. Por consiguiente lograremos reducir el consumo de energía y mejorar la capacidad de enfriamiento en dichas torres.

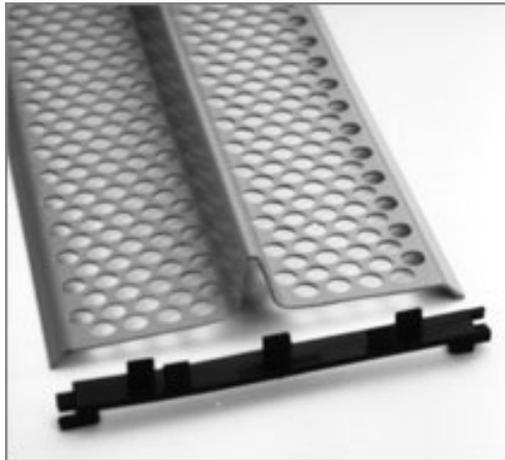


Figura 4.9 Modelo de barra Gull Wing

Fuente: http://www.ceshepherd.com/splash_fills.html (s.f.)

4.5.2 Creación de un programa de mantenimiento para las torres de enfriamiento E-951, M-7154 y M-7156

Como parte del mejoramiento de la capacidad de enfriamiento de las torres E-951, M-7154 y M-7156, se presenta un programa de mantenimiento (ver Tabla 4.16) basándose en los manuales de SPX COOLING TECHNOLOGIES (2009) *Torres de Enfriamiento–Marley Clase–W400 y*

Tower Tech (2010) los cuales hacen referencia a todas las partes que requieren mantenimiento periódico.

Asimismo, Blair y otros (2002) indican un programa de mantenimiento mínimo para las torres de enfriamiento. Además Hensley John, C. (2009), describe detalladamente cada parte de una torre de enfriamiento, sirviendo de soporte para la creación del programa de mantenimiento en cuestión. La creación de este programa servirá para realizar un mantenimiento preventivo en las torres de enfriamiento E-951, M-7154 y M-7156 asegurando el funcionamiento normal.

Tabla 4.16 Programa de mantenimiento para las torres de enfriamiento E-951, M-7154 y M-7156

	Ventilador	Cilindro del ventilador	Motor del ventilador	Aspas	Eliminadores de rocío	Piscinas de aguas	Sistema de inyección de químicos	Boquillas de distribución	Reileno	Carcasa de la torre	Persianas	Escaleras, barandas, plataformas y puertas
01 Inspeccionar presencia de obstrucciones					S	S		S	S		S	
02 Verificar presencia de ruidos y vibraciones	D		D	D								
03 Verificar los sellos de aceite			M									
04 Ajustar tornillos	T	T	T	T								
05 Revisar balanceo	A		A	A								
06 Revisar estado general	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D
07 Inspeccionar presencia de inscrucciones y/o algas.		D			D	D		D	D	D	D	D
08 Tomar muestras de aguas para análisis Físico-Químico						D						
09 Retocar pintura		R	R									
10 Realizar limpieza	R	R	R	R	R	R		R	R	R	R	R
11 Inspeccionar y reparar secciones deterioradas	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R
12 Inspeccionar y reparar antes de cada uso												R

D-Diario S-Semanal M-Mensual T-Trimestral A-Anual R-Según se requiera

En las torres de enfriamiento es importante aplicar rutinas de mantenimiento ya que estaremos maximizando tanto la capacidad térmica como la eficiencia en los sistemas electromecánicos, minimizando la inversión de capital en equipos y/o repuestos para extender su ciclo de vida útil. Asimismo, obtendremos mermar los gastos de mantenimiento anual a través de medidas preventivas a cambio de reparaciones de mayor envergadura por costo más elevado.

4.6 PRESENTACIÓN DE UN ESTIMADO DE COSTO CLASE V, CON LA FINALIDAD DE RESPALDAR LA TOMA DE DECISIONES EN LA IMPLANTACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS GENERADAS

Para las alternativas seleccionadas se soportó mediante un estimado de costo clase V, para estimar el número de barras requeridas en las torres de enfriamiento y conocido el porcentaje requerido a reemplazar, se calculó el número total de barras a reemplazar en los rellenos de las torres (ver Tabla 4.17).

Tabla 4.17 Estimación del número total de barras a reemplazar en las torres de enfriamiento M-7154 y M-7156

Torres de enfriamiento	Número total de barras	Porcentaje de reemplazo (%)	Numero de barras para reemplazar
M-7154	601.350	90	541.215
M-7156	6.609	20	1.322

Luego para llevar a cabo dicho estimado se necesitó los costos unitarios de las barras requeridas en cada torre suministrados por el fabricante “C.E. Shepherd Company” (ver APÉNDICE F), y la mano de obra de instalación

representó el 75% del costo total del relleno, según (Amertech Tower Services, LLC., 2011), mostrado en la Tabla 4.18.

Para el estimar el costo de envío fue suministrado por el fabricante “C.E. Shepherd Company”, el cual fue estimado bajo los términos comerciales internacionales de 2010 (CIF- Costo, seguro y flete), en el cual es exportador es responsable del transporte de la mercancía hasta que esta se encuentre en el puerto de destino, junto con los seguros involucrados. El importador solo debe adquirir un seguro con cobertura mínima. Este costo estimado fue igual a **Bs. 263.409,49**.

Tabla 4.18 Costo total por barras requeridas para la sustitución del relleno en las torres de enfriamiento M-7154 y M-7156

Torre de enfriamiento	Costo de barras a reemplazar (Bs.)	Costo de instalación (Bs.)	Costo total (Bs.)
M-7154	3.273.268,32	2.454.951,24	5.728.219,56
M-7156	7.995,46	5.996,59	13.992,05

Al totalizar dicha inversión para la sustitución del relleno en las torres de enfriamiento M-7154 y M-7156 nos arrojó un valor igual a **Bs. 6.005.621,10**.

Es importante resaltar que este mantenimiento publicado por Enercon Service, Inc. (2003), se debe aplicar para las torres de enfriamiento E-951, M-7154 y M-7156, debido a las desviaciones encontradas lo que se traduce para un costo estimado anual para cada torre de enfriamiento de **Bs.3.150.000,00**.

Tabla. 4.19 Costo de mantenimiento preventivo y correctivo en torres de enfriamiento

<i>Mensualmente</i>	Inspeccione presencia de obstrucción en los eliminadores de rocío y relleno. Revise los sellos de aceite en el motor del ventilador, nivel y condición del aceite.
<i>Trimestralmente</i>	Limpiar y pintar los ventiladores, eliminadores de rocío, relleno y sistema de distribución de agua caliente. Balancear los ventiladores y eje impulsor.
<i>Inspección semestral</i>	Revise los tornillos de fijación y apriete los pernos en los ventiladores. Cambie el aceite y controlar el estado de ventilación de los Engranaje de reducción (reductor de velocidad). Comprobar la holgura de las aspas. Compruebe si hay fugas en el relleno, piscinas y en el sistema de distribución de agua caliente. Inspeccione el estado general y reparar todos los componentes necesarios de la torre, incluyendo grúas y montacargas.
<i>Inspección anual y mantenimiento correctivo</i>	Inspeccione el estado general de las piscinas, filtro de succión y la carcasa de la torre. Inspección y/o reparación de los ventiladores, componentes de la torre de acceso como son escaleras, pasillos, puertas, pasamanos. A partir de 16 años, la sustitución de las aspas del ventilador, motores de ventilador, caja de cambios del ventilador, de relleno y eliminadores de rocío.
<i>Costo estimado anual</i>	De 01 a 05 años Bs. 3.150.000,00 (\$500,000.00)
	De 06 a 15 años Bs. 6.300.000,00 (\$1,000,000.00)
	De 16 a 20 años Bs. 12.600.000,00 (\$2,000,000.00)

Fuente: Enercon Services, Inc., 2003, p16.

Finalmente mostraremos una tabla resumen para totalizar los costos asociados a las alternativas desarrolladas en el período de un año mostradas en la Tabla 4.20.

Tabla 4.20 Costos asociados al mantenimiento preventivo y correctivo en las torres de enfriamiento E-951, M-7154 y M-7156

Alternativas desarrolladas	Costos (Bs.)
Sustitución del relleno para las torres M-7154 y M-7156	6.005.621,10
Mantenimiento preventivo y correctivo para las tres torres de enfriamiento	9.450.000,00
COSTO TOTAL	15.455.621,10

Con estos costos tendremos una visión a “Grosso Modo” de las alternativas desarrolladas, estimando cuanto se requiere tanto para restauración de partes como para el mantenimiento preventivo y correctivo, respaldando la toma de decisiones con respecto a la preparación de un plan de ejecución para incrementar la capacidad térmica a corto plazo y poder solicitar los fondos para su implantación.

Del mismo modo se estimó el costo total instalado (CTI) de cada una de las torres (ver Tabla 4.21), para la torre E-951 mediante la bibliografía de “P.D.V.S.A. (1996) Manual de estimaciones de costos clase V. Sistemas de enfriamiento: Torres de enfriamiento”, el cual contiene información que permite obtener el estimado del (CTI) para el enfriamiento de agua para plantas de torres de enfriamiento con estructura de madera de tiro inducido con flujo cruzado. La data de costo con la cual se generaron las correlaciones y curvas, provienen directamente de fabricantes y proveedores.

Esta data se validó con información disponible en las filiales operadoras de PDVSA.

Para las torres E-951, M-7154 y M-7156 se estimó el (CTI) (ver Tabla 4.22) a través de la bibliografía “SRI CONSULTING (2006). Process Economics Program Report 145B Offsite Investment Cost Estimation” el cual proporcionan estimaciones de inversión de planta para una amplia gama de productos químicos, polímeros y procesos de refinería. Para la estimación del (CTI) en las torres de enfriamiento se basan en las capacidades que van desde 1000 GPM hasta 150000 GPM. Las partidas de gastos más importantes son la torre de enfriamiento, fundación, accionamiento del ventilador, las bombas y la distribución.

Tabla 4.21 Estimación del costo total instalado para las nuevas torres de enfriamiento E-951, M-7154 y M-7156

Torre de enfriamiento nuevas	Costos (Bs.)
E-951	5.426.844,26
M-7154	21.122.444,70
M-7156	8.849.607,42
COSTO TOTAL	36.272.052,12

Posteriormente se calculó la diferencia de costos para las torres de enfriamiento E-951, M-7154 y M-7156 mediante la diferencia de costos entre la inversión asociada al mantenimiento preventivo y correctivo respecto a la inversión asociada al costo total instalado mostrado en la Tabla 4.22.

Tabla 4.22 Diferencia de costos para las torres de enfriamiento E-951, M-7154 y M-7156

Tipo de inversión	Costos (Bs.)
Mantenimiento preventivo y correctivo	15.455.621,10
Costo total instalado	36.272.052,12
DIFERENCIA DE COSTOS	20.816.431,02

El Instituto para la diversificación y ahorro de la energía (2007), destaca que es importante mantener la vida útil de las torres de enfriamiento, ya que un funcionamiento deficiente acarrearía gastos de reparación o pérdidas por bajo rendimiento ocasionando la reposición prematura de la inversión de equipos nuevos.

Respecto a la diferencia de costos (ver Tabla 4.22) representará la optimización de los recursos financieros, enfocándolos al mantenimiento preventivo y correctivo. Este último podría aumentar dichos recursos de no realizar oportunamente la implantación y seguimiento preventivo en las diferentes torres de enfriamiento.

El mantenimiento en las torres de enfriamiento debe procurar un desempeño continuo destinado a mantener la capacidad de enfriamiento, reducir costos por averías o desperfectos, disminuir los gastos por equipos nuevos y maximizar la vida útil de cada parte que conforma dicha torre asegurando la disponibilidad total de todo el sistema de enfriamiento.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En esta sección se incluyen las conclusiones más relevantes de la investigación y las recomendaciones para futuras investigaciones de este tema. En relación a las conclusiones se destacan las siguientes:

CONCLUSIONES

1. Las torres de enfriamiento E-951, M-7154 y M-7156 presentaron porcentajes de efectividad del 65,54%, 42,29% y 78,57% respectivamente lo que indica problemas con el enfriamiento inducido por obstrucciones en las torres y suciedad en el relleno.
2. La capacidad térmica en las torres de enfriamiento E-951, M-7154 y M-7156 por el método de curvas de comportamiento arrojaron valores de 29,2%, 37,5% y 86,4% respectivamente evidenciando deficiencias en el sistema de enfriamiento asociados a la infraestructura y operación.
3. A través de la herramienta Diagrama de Ishikawa se dilucidaron deficiencias operacionales en las torres E-951, M-7154 y M-7156 asociadas principalmente al relleno, baja calidad del agua y crecimiento microbiano en sus infraestructuras las cuales fueron verificadas en campo.
4. A través de la herramienta “Tormentas de Ideas”, se obtuvieron diferentes alternativas significativas para incrementar la capacidad térmica y vida útil de las tres torres, encontrando principalmente dos alternativas: sustitución del relleno e implementación de un plan de mantenimiento general.

5. Para incrementar la capacidad de enfriamiento de las torres M-7154 y M-7156 se debe realizar la sustitución del relleno con barras de alta calidad de PVC extrusionado con un total de 541.215 y 1.322 unidades respectivamente.
6. La aplicación de rutinas de mantenimiento preventivo tanto en la infraestructura como accesorios de las torres de enfriamiento E-951, M-7154 y M-7156 mejorará la capacidad de enfriamiento minimizando la inversión de capital en equipos nuevos y/o repuestos.
7. La aplicación de un mantenimiento preventivo y correctivo en las torres de enfriamiento E-951, M-7154 y M-7156 traerá como beneficio la optimización de los recursos financieros de la empresa, obteniendo como ahorro un total de Bs.20.816.431,02.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda realizar una evaluación tanto en los cabezales de agua fría y caliente como en los equipos asociados al sistema de enfriamiento que permitan localizar pérdidas de agua.
2. Se sugiere revisar la efectividad en la dosificación de inhibidores químicos, necesarios para lograr que el agua posea una característica química tal que no sea ni extremadamente corrosiva ni extremadamente incrustante.
3. Se recomienda realizar un estimado de costos para solicitar la aprobación de fondos en el presupuesto de inversiones a fin de ejecutar la ingeniería de detalle, procura y arranque del proyecto
4. Ejecutar con rigurosidad el plan de mantenimiento preventivo propuesto en las torres E-951, M-7154 y M-7156.
5. Implementar la instrumentación necesaria en el sistema de enfriamiento para medir los parámetros tales como: caudal y temperatura de agua caliente, fría, de reposición y purga, temperatura de bulbo húmedo y seco en las entradas de aire, velocidad del viento y presión barométrica.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American Water Works Association. (2002). *Calidad y tratamiento del agua* (5ta. ed.) McGraw-Hill Interamericana de España, S. A. U.

Amertech Tower Services, LLC. (2011) [Página web en línea]. Disponible: <http://www.amertechtowerservices.com/> [Consulta: 2012, julio 07].

Black & Veatch (1996). *Power Plant Engineering*. Springer Science+Business Media, Inc. Chapman & Hall, New York.

Blair, G., Nagata, J., Durkin, J., Reger J., Geiger H., Tovar M., McDonugh K., Wilson E. y Mukhar J. (2002) *Guidelines for Managing Water in Cooling Systems For Owners, Operators, and Environmental Managers* [Documento en línea], Disponible: <http://www.sanjoseca.gov/esd/PDFs/cooling.pdf> [Consulta: 2012, octubre 16].

C. E. Shepherd Company (s.f.). [Página Web en Línea]. Disponible: http://www.ceshepherd.com/splash_fills.html [Consulta: 2012, agosto 20].

Cooling Technology Institute. (2000). Acceptance Test Code for Water-Cooling Tower. (CTI Code ATC-105). [Documento en línea]. Disponible: <http://www.cti.org/pub/cticode.shtml> [2011, Febrero 3].

Colina, A. (2002). *Diseño de interconexión de los sistemas de agua de enfriamiento para flexibilidad operacional y mantenimiento de la torre M-7154 de la Refinería el Palito*. Universidad Fermín Toro. Facultad de Ingeniería. Escuela de Mantenimiento Mecánico. Cabudare. Venezuela.

DRB Cooling Towers (2011). [Página Web en Línea]. Disponible: http://www.drbcoolingtowers.com/fill_media.php [Consulta: 2012, agosto 10].

Durand A., Suárez R., Roman F., Cornejo A. y Vasquez Luis (2012). Cooling water outlet temperature: evaluating the best maximum value. *Chemical Engineering*, 119 (9), 46-50.

Enercon Services, Inc. (2003). Economic and Environmental Impacts Associated with Conversion of Indian Point Units 2 and 3 to a Closed-Loop Condenser Cooling Water Configuration. [Documento en línea]. Disponible: http://www.dec.ny.gov/docs/permits_ej_operations_pdf/clsdlpatt1a.pdf [Consulta: 2012, julio 06].

Gougol M., Dezvareh H. y Pouresfandiary J. (2009). Optimal Cooling Systems for Coastal Plants. *Chemical Engineering*, 116 (5), 45-48.

Goyal J. (2012). Effective Thermal Design Of Cooling Towers. *Chemical Engineering*, 119 (2), 24-29.

Hensley John, C. (2009). *Cooling Tower Fundamentals* (2a. ed.) SPX Cooling Technologies. United State Of America. Disponible: <http://spxcooling.com/pdf/Cooling-Tower-Fundamentals.pdf> [Consulta: 2012, julio 06].

INSTITUTO PARA LA DIVERSIFICACIÓN Y AHORRO DE LA ENERGÍA (2007). Guía técnica de torres de refrigeración. [Documento en línea], Disponible:http://www.idae.es/index.php/mod.documentos/mem.descarga?file=/documentos_10540_Torres_refrigeracion_GT4_07_0d6a8abe.pdf [Consulta: 2012, octubre 25].

Mora Jesús F. (2003). Máquinas Eléctricas. (5ta. ed.) McGraw-Hill Interamericana de España, S. A. U.

McCabe W., Smith J. y Harriot P. (2002). *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química*. (6a. ed.). McGraw-Hill Interamericana Editores. México, D.F.

Ludwing Ernests, E. (1997). *Applied Process Design for Chemical and Petrochemical Plants*. (3a. ed., Vol. 2) Gulf Professional Publishing. United State Of America.

Lugo, R., Torres, A., Toledo, M., y Sánchez F. (2003). Sistemas de enfriamiento de centrales termoeléctricas. *Información Tecnológica* [Documento en línea]. Disponible: lulr@xanum.uam.mx

Lyons William, C. (1996). *Standard handbook of petroleum & natural gas engineering*. (Vol. 2). Gulf Professional Publishing. United State Of America.

Perry R., Green D. y Maloney J. (1992). *Perry Manual del Ingeniero Químico*. (6a. ed.). McGraw-Hill Interamericana Editores. México, D.F.

P.D.V.S.A., (2008). Compendio Petróleos de Venezuela, Sociedad Anónima.
P.D.V.S.A., (2008). Descripción general del sistema de agua de enfriamiento de la R.E.P.

Schultz Tomas. (2008). Water Reuse and Conservation in the CPI. *Chemical Engineering*, 115 (9), 44-50.

Sirena, J.A. (2010). Evaluación experimental de torres para enfriamiento de agua. (Edición 26). Departamento de Aeronáutica, Facultad de C.E.F. y Nat., U.N.C. [Documento en línea], Disponible:<http://www.efn.uncor.edu/departamentos/aero/InvyDesa/Documentos/ARsirena.pdf>

Sirena J., Galeasso A. y Najle P. (2010). Predicción y evaluación empírica del coeficiente de pérdida de carga en rellenos de torres de enfriamiento de agua. *Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica*. [Revista en línea], (14), pp. 25-40, Disponible: <http://www.uned.es/ribim/v14n2Octubre10.html> [Consulta: 2012, Julio 7].

SPX COOLING TECHNOLOGIES. (2008). *Cooling Tower Inspection Tips. User Manual 92-1474C* [Documento en línea]. Disponible: <http://spxcooling.com/pdf/M92-1474C.pdf> [Consulta: 2012, julio 07].

SPX COOLING TECHNOLOGIES. (2009). *Torres de Enfriamiento–Marley Clase–W400. Manual del usuario sp_92-1312D* [Documento en línea]. Disponible: http://spxcooling.com/pdf/sp_M92-1312D.pdf [Consulta: 2012, julio 05].

SRI CONSULTING (2006). Process Economics Program Report 145B Offsite Investment Cost Estimation [Documento en línea], Disponible: <http://www.ihs.com/products/chemical/technology/pep/offsite-investment-cost-estimation.aspx>

Tower Tech (2010). Manual de la Instalación, Operación y Mantenimiento - Torre de Enfriamiento Modular Serie TTXL [Documento en línea], Disponible: http://www.towertechinc.com/documents/ESPANOL_SERIE_TTXL_MANUAL_IOM_VER_MK9000-9_REV_10012010.pdf

Universidad Pedagógica Experimental Libertador, Vicerrectorado de Investigación y Postgrado. (2006). *Manual de Trabajos de Grado de Especialización y Maestría y Tesis Doctorales*. Caracas.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY (2011). Cooling Towers: Understanding Key Components of Cooling Towers and How to Improve Water Efficiency [Documento en línea], Disponible: http://www1.eere.energy.gov/femp/pdfs/waterfs_coolingtowers.pdf [Consulta: 2012, agosto 16].

Zanotty, A. (2004). *Evaluación del sistema de enfriamiento de la Refinería el Palito*. Universidad de Carabobo. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Química. Valencia. Venezuela.

APÉNDICES

APÉNDICE A: CÁLCULOS TÍPICOS

En esta sección se incluyen los cálculos típicos hechos para la obtención de los resultados reportados en el capítulo IV.

A.1 Calor retirado en la torre de enfriamiento E-951 empleando la ecuación 3.6.

en donde los datos del fabricante son:

$$F_1 = 11.000 \text{ GPM}$$

$$C_p = 1 \text{ BTU/lb.}^\circ\text{F}$$

$$T_{AC} = 117^\circ\text{F}$$

$$T_{AF} = 87^\circ\text{F}$$

Transformando las unidades de la siguiente manera:

$$F_1 = 11.000 \frac{\text{gal}}{\text{min}} * \frac{3,785\text{L}}{1\text{gal}} * \frac{1\text{kg}}{\text{L}} * \frac{1\text{lb}}{0,454\text{kg}} * \frac{60\text{min}}{1\text{h}}$$

$$F_1 = 5.502.422,91 \frac{\text{lb}}{\text{h}}$$

Sustituyendo y calculando los datos de diseño de la torre de enfriamiento E-951 el calor retirado resultará de la siguiente manera:

$$Q_p = 5.502.442,91 \frac{\text{lb}}{\text{h}} * \frac{1\text{BTU}}{\text{lb}\Delta^\circ\text{F}} * (117^\circ\text{F} - 87^\circ\text{F}) * \frac{1\text{MMBTU}}{10^6\text{BTU}}$$

$$Q_p = 165,07 \frac{\text{MMBTU}}{\text{h}}$$

De igual forma los datos del fabricante de la torre M-7154:

$$F_1 = 75.000 \text{ GPM}$$

$$C_p = 1 \text{ BTU/lb.}^\circ\text{F}$$

$$T_{AC} = 105 \text{ }^\circ\text{F}$$

$$T_{AF} = 87 \text{ }^\circ\text{F}$$

Sustituyendo y calculando los datos de diseño de la torre de enfriamiento M-7154 el calor retirado resultará de la siguiente manera:

$$Q_p = 675,30 \frac{\text{MMBTU}}{h}$$

De igual forma los datos del fabricante de la torre M-7156:

$$F_1 = 22.000 \text{ GPM}$$

$$C_p = 1 \text{ BTU/lb.}^\circ\text{F}$$

$$T_{AC} = 117 \text{ }^\circ\text{F}$$

$$T_{AF} = 87 \text{ }^\circ\text{F}$$

Sustituyendo y calculando los datos de diseño de la torre de enfriamiento M-7156 el calor retirado resultará de la siguiente manera:

$$Q_p = 330,15 \frac{\text{MMBTU}}{h}$$

A.2 Caudal medido en campo para la torre de enfriamiento E-951.

Para el cálculo del caudal medido en campo se utilizó la ecuación 3.8 tomado del manual del dispositivo portátil modelo HFM, para este caso se mostrará el cálculo para el caudal de agua caliente.

en donde:

$$V: 1,6 \text{ ft/s}$$

$$ID: 30 \text{ plg}$$

$$\text{Caudal} = 2.45 * 1,6 \text{ ft / s} * (30 \text{ plg})^2 = 3.528 \text{ GPM}$$

A.3 Rango real e ideal de enfriamiento de la torre E-951.

Para el rango real se determinó de la siguiente manera:

$$T_{AC} = 121,1 \text{ } ^\circ\text{F}$$

$$T_{AF} = 95,8 \text{ } ^\circ\text{F}$$

$$T_{WH} = 82,5 \text{ } ^\circ\text{F}$$

$$Rango_{real} = (121,1 - 95,8)^\circ F = 25,3^\circ F$$

Y para el rango ideal

$$Rango_{ideal} = (121,1 - 82,5)^\circ F = 38,6^\circ F$$

A.4 Acercamiento de la torre de enfriamiento E-951.

Para el acercamiento de la torre se determinó de la siguiente manera:

$$T_{AC} = 121,1 \text{ } ^\circ\text{F}$$

$$T_{WH} = 82,5 \text{ } ^\circ\text{F}$$

$$Acercamiento = (121,1 - 82,5)^\circ F = 13,3^\circ F$$

A.5 Pérdidas asociadas a la torre de enfriamiento E-951 empleando los modelos matemáticos suministrado por el fabricante:

Perdidas por evaporación suministrado por el fabricante:

$$Pe = 3\% F_2$$

Pe: pérdidas por evaporación

F₂: caudal de agua caliente de la torre (agua de circulación)

$$Pe = 3\% * 3258GPM$$

$$Pe = 97,74GPM$$

Pérdidas por fricción suministrado por el fabricante:

$$Pf = 0,05\% F_2$$

Pf: pérdidas por fricción

$$Pf = 0,05\% * 3258GPM$$

$$Pf = 1,63GPM$$

Pérdidas por efecto del viento suministrado por el fabricante:

$$Pev = 0,2\% F_2$$

Pev: pérdidas por efecto del viento

$$Pev = 0,2\% * 3258GPM$$

$$Pev = 6,52GPM$$

Perdidas por fugas:

$$Qrep = Pe + Ppu + Pfu \text{ (Balance de agua)}$$

Qrep: caudal de reposición

Ppu: purga de la torre

Pfu: pérdidas por fugas

Despejando Pfu y sustituyendo los valores correspondientes a la torre E-951 se tiene:

$$Pfu = 21,38GPM$$

Finalmente las pérdidas totales:

$$P_t = P_e + P_f + P_{ev} + P_{pu} + P_{fu}$$

$$P_t = 350,2GPM$$

A.6 Cálculo de potencia en los ventiladores de la torres de enfriamiento E-951, se utilizará la ecuación 3.9 (ver capítulo III), mostrado a continuación:

Se calculará para el ventilador ubicado en la posición N° 1 denominado E-951-1, en la cual se sustituyó los siguientes datos recolectados en campo:

V: 440 V.

I: 61,87 A.

Factor de conversión: 1BHP = 745,7 W

en donde:

$$P = \frac{\sqrt{3} * 440V * 61,87A}{745,7 \frac{W}{BHP}}$$

resolviendo:

$$P = 63HP$$

A.7 Cálculo del porcentaje de efectividad en la torre de enfriamiento E-951, se utilizó la ecuación destacada por el autor Goyal J. (2012) mostrado a continuación:

Para ello se requiere los siguientes datos, como son el rango y el acercamiento.

Datos:

Rango = 25,3 °F

Acercamiento = 13,3 °F

$$Eficacia = \left(\frac{Rango}{Rango + Acercamiento} \right) * 100$$

Sustituyendo:

$$Eficacia = \left(\frac{25,3^{\circ}F}{25,3^{\circ}F + 13,3^{\circ}F} \right) * 100$$

Finalmente se tiene el siguiente resultado:

$$Eficacia = 65,54\%$$

A.8 Cálculo del caudal corregido para la torre E-951.

De acuerdo con la ecuación 3.10 y conocido los datos medidos en campo y de diseño de dicha torre.

$$Q_{wt} = 7.711 \text{ GPM}$$

$$W_d = 209,2 \text{ BHP}$$

$$W_t = 241 \text{ BHP}$$

$$\rho_t = 0,07021 \text{ lb/ft}^3$$

$$\rho_t = 0,069 \text{ lb/ft}^3$$

Sustituyendo en la ecuación 3.10 se determinó el caudal corregido como se muestra en la siguiente ecuación:

$$Q_{wtadj} = 7.711GPM \left(\frac{209,2BHP}{241BHP} \right)^{1/3} \left(\frac{0,07021.lb / ft^3}{0,069.lb / ft^3} \right)^{1/3}$$

resolviendo:

$$Q_{wtadj} = 7.401GPM$$

A.9 Cálculo de la capacidad actual de la torre E-951.

De acuerdo con la ecuación 3.13 y conocido el caudal corregido y predicho.

$$Q_{wtadj} = 7.401 \text{ GPM}$$

$$Q_{wpred} = 25.387 \text{ GPM}$$

$$C = \frac{7.401GPM}{25.387GPM} \times 100$$

$$C = 29,2\%$$

APÉNDICE B: PARÁMETROS MEDIDOS EN CAMPO

En esta sección se incluyen los parámetros medidos con los instrumentos de medición correspondientes a las torres de enfriamiento de la R.E.P.

Tabla B.1 Parámetros a medir en la entrada de la torre de enfriamiento E-951

Nº de estaciones	Temperatura de bulbo seco (°C)	Humedad relativa (%)	Velocidad del viento (MHP)	Temperatura de rocío (°C)
1	29,4	83,1	2,3	26,1
2	29,5	83,2	3,2	26,5
3	29,4	82,6	2,8	26,4
4	29,4	84,1	5,4	26,4
5	29,5	82,8	5,6	26,4
6	28,4	93,8	1,2	27
7	29,2	94,6	1,6	29,1
8	30,7	97,6	1,7	29
9	30,1	96,5	1,2	29
10	30,4	95	1,9	28,9
Promedio	29,5	89,3	2,7	27,5

Temperatura de bulbo húmedo: 82,5 °F

Tabla B.2 Flujo de agua fría en la salida en la torre de enfriamiento E-951

Nº de mediciones	Flujo en la descarga de las bombas (GPM)	
	G-956	G-957A
Promedio	4.179	3.532
Total	7.711	

Tabla B.3 Temperaturas del fluido en la salida de la torre de enfriamiento E-951

Nº de mediciones	Temperatura de agua fría en la descarga de las bombas (°F)	
	G-956	G-957A
1	97,4	97
2	92,5	96,3
Promedio	95,8	

Tabla B.4 Presiones del fluido en la salida de la torre de enfriamiento E-951

N° de mediciones	Presión en la descarga de las bombas (psi)	
	G-956	G-957A
1	70	70
2	70	70

Tabla B.5 Flujo del fluido en la entrada de la torre de enfriamiento E-951

N° de mediciones	Flujo de agua caliente (GPM)	Flujo de agua de reposición (GPM)
Promedio	3.528	342

Tabla B.6 Temperaturas del fluido en la entrada de la torre de enfriamiento E-951

N° de mediciones	Temperatura de agua caliente (°F)	Temperatura de agua de reposición (°F)
1	121,7	84,3
2	120,4	84,7
Promedio	121,1	84,5

Tabla B.7 Corriente eléctrica de los ventiladores en la torre de enfriamiento E-951

Ventilador E-951-1			Ventilador E-9151-2			Ventilador E-951-3			Ventilador E-951-4		
Corriente Eléctrica (A)			Corriente Eléctrica (A)			Corriente Eléctrica (A)			Corriente Eléctrica (A)		
63,4	60,7	61,5	61,7	60,2	60,4	57,6	56,3	57,4	55,7	55,9	55,8

Tabla B.8 Potencia de los ventiladores de la torre de enfriamiento E-951

Ventilador E-951-1	Ventilador E-9151-2	Ventilador E-951-3	Ventilador E-951-4
Potencia (BHP)	Potencia (BHP)	Potencia (BHP)	Potencia (BHP)
63	62	58	57

Tabla B.9 Parámetros a medir en la entrada de las torres de enfriamiento de la torre de enfriamiento M-7154

N° de estaciones	Temperatura de bulbo seco (°C)	Humedad relativa (%)	Velocidad del viento (MHP)	Temperatura de rocío (°C)
1	31,2	72,1	8,8	24,4
2	31,1	71,8	6	25,4
3	34,3	71,7	11,7	31,7
4	33,8	93,3	11,4	33,5
5	30,2	98,9	1,2	29,8
6	28,3	79,5	2,5	24
7	28,2	78	4	24,1
8	32	66,4	2,9	25
9	32,8	65,1	2,1	25
10	33,1	67,4	2,4	25,3
11	33,5	66,2	2,7	25,2
12	33,2	60	3,1	25
13	32	60,7	4,6	24
14	32	63,2	2,5	24

Temperatura de bulbo húmedo: 81,5 °F

Tabla B.10 Velocidades del fluido en la salida de la torre de enfriamiento M-7154

N° de mediciones	Velocidad de agua fría en la descarga de las bombas (ft/s)	
	G-7157A	G-7157C
1	7,8	8,6
2	8	9,8

Tabla B.11 Temperaturas del fluido en la salida de la torre de enfriamiento M-7154

N° de mediciones	Temperatura de agua fría en la descarga de las bombas (°F)	
	G-7157A	G-7157C
1	100,9	101,9
2	102,2	101,9

Tabla B.12 Presiones del fluido en la salida de la torre de enfriamiento M-7154

N° de mediciones	Presión en la descarga de las bombas (psi)	
	G-7157A	G-7157C
1	66	62
2	66	64

Tabla B.13 Velocidades del fluido en la entrada de la torre de enfriamiento M-7154

N° de mediciones	Velocidad de agua caliente (ft/s)		Velocidad de agua de reposición (ft/s)
	Subcabezal Norte	Subcabezal Sur	
1	2,8	2,9	3,1
2	2,5	2,9	2,6

Tabla B.14 Temperaturas del fluido en la entrada de la torre de enfriamiento M-7154

N° de mediciones	Temperatura de agua caliente (°F)		Temperatura de agua de reposición (°F)
	Subcabezal Norte	Subcabezal Sur	
1	115	118	78,5
2	114,7	118,4	81

Tabla B.15 Corriente eléctrica de los ventiladores en la torre de enfriamiento M-7154

Ventilador M-7154A	Ventilador M-7154B	Ventilador M-7154D	Ventilador M-7154E	Ventilador M-7154F
Corriente Eléctrica (A)				
183	208	186	173	184

Tabla B.16 Voltaje de los ventiladores de la torre de enfriamiento M-7154

Ventilador M-7154A	Ventilador M-7154B	Ventilador M-7154D	Ventilador M-7154E	Ventilador M-7154F
Voltaje (V)				
477	470	469	476	471

Tabla B.17 Potencia de los ventiladores en la torre de enfriamiento M-7154

Ventilador M-7154 ^a	Ventilador M-7154B	Ventilador M-7154D	Ventilador M-7154E	Ventilador M-7154F
Potencia (BHP)	Potencia (BHP)	Potencia (BHP)	Potencia (BHP)	Potencia (BHP)
203	238	203	191	201

Tabla B.18 Parámetros a medir en la entrada de la torre de enfriamiento M-7156

N° de estaciones	Temperatura de bulbo seco (°C)	Humedad relativa (%)	Velocidad del viento (MHP)	Temperatura de rocío (°C)
1	33,1	64,9	1	27,6
2	32,7	66,1	1,2	24,6
3	33,2	64,8	1,1	26,3
4	34,9	65,5	1,8	26,2
5	34,2	66,2	2,9	25,1
6	30,2	67,6	0,2	24,4
7	32,2	66,9	0,9	24,9
8	33	62,5	4	26
9	31,3	72,2	3,5	25,6
10	31,5	71,8	3	25,7

Temperatura de bulbo húmedo: 81 °F

Tabla B.19 Velocidades del fluido en la salida en la torre de enfriamiento M-7156

N° de mediciones	Velocidad de agua fría en la descarga de las bombas (ft/s)	
	G-7160A	G-7160B
1	4,9	8,9
2	4,7	9,2

Tabla B.20 Temperaturas del fluido en la salida de la torre de enfriamiento M-7156

N° de mediciones	Temperatura de agua fría en la descarga de las bombas (°F)	
	G-7160A	G-7160B
1	88,5	85,6
2	88,5	87,7
Promedio	95,8	

Tabla B.21 Presiones del fluido en la salida de la torre de enfriamiento M-7156

N° de mediciones	Presión en la descarga de las bombas (psi)	
	G-7160A	G-7160B
1	86	88
2	86	88

Tabla B.22 Velocidades del fluido en la entrada de la torre de enfriamiento M-7156

N° de mediciones	Velocidad de agua caliente (ft/s)	Velocidad de agua de reposición (ft/s)
1	1,1	0,5
2	1	0,5

Tabla B.23 Temperaturas del fluido en la entrada de la torre de enfriamiento M-7156

N° de mediciones	Temperatura de agua caliente (°F)	Temperatura de agua de reposición (°F)
1	109,6	83,8
2	114	84,2

Tabla B.24 Corriente eléctrica de los ventiladores en la torre de enfriamiento M-7156

Ventilador M-7156A	Ventilador M-7156B
Corriente Eléctrica (A)	Corriente Eléctrica (A)
107	127

Tabla B.25 Voltaje de los ventiladores en la torre de enfriamiento M-7156

Ventilador M-7156A	Ventilador M-7156B
Voltaje (V)	Voltaje (V)
480	480

**Tabla B.26 Potencia de los ventiladores en la torre de enfriamiento
M-7156**

Ventilador M-7156A	Ventilador M-7156B
Potencia (BHP)	Potencia (BHP)
119,3	141,6

APÉNDICE C: CARTA PSICOMÉTRICA

En esta sección se muestra la carta psicométrica utilizada para torres empacadas para la determinación de la temperatura de bulbo húmedo.

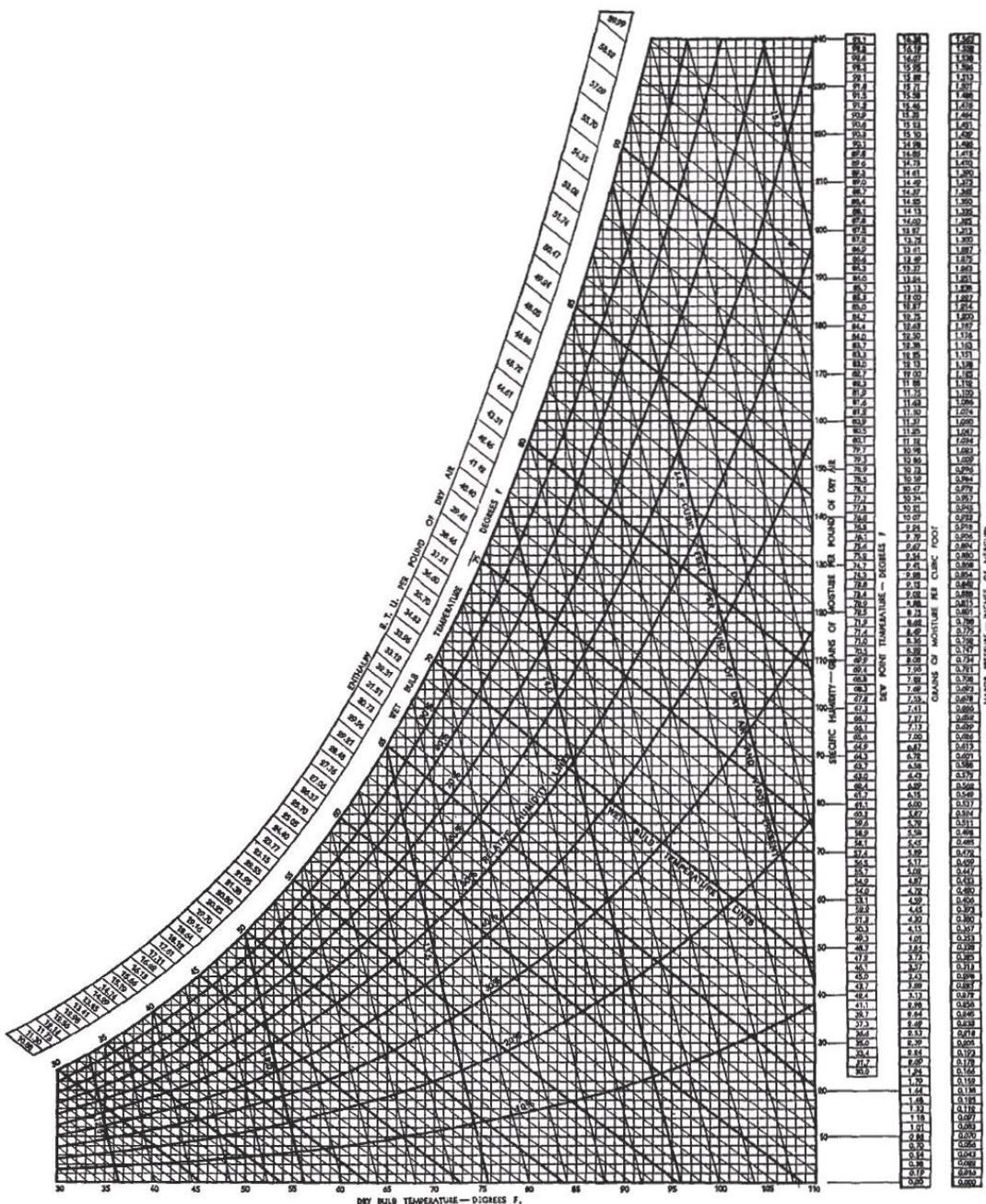


Figura C1. Psychrometric chart, reference barometric pressure of 29.92 in. Hg. Used by permission of Westinghouse Electric Co., Sturtevant Div.

APÉNDICE D: GRÁFICAS (Curvas de comportamiento de las torres)

En esta sección se incluyen las curvas correspondientes a las torres de enfriamiento de la R.E.P. suministrada por los fabricantes.

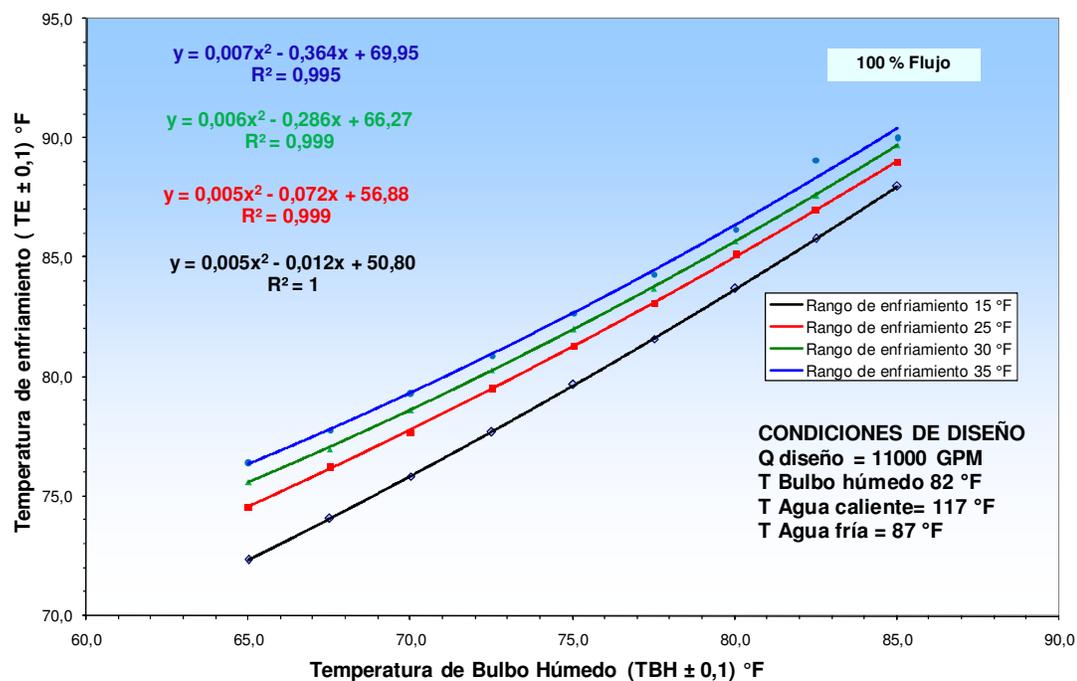


Figura D.1 Curva de comportamiento de la torre E-951 al 100% de su capacidad

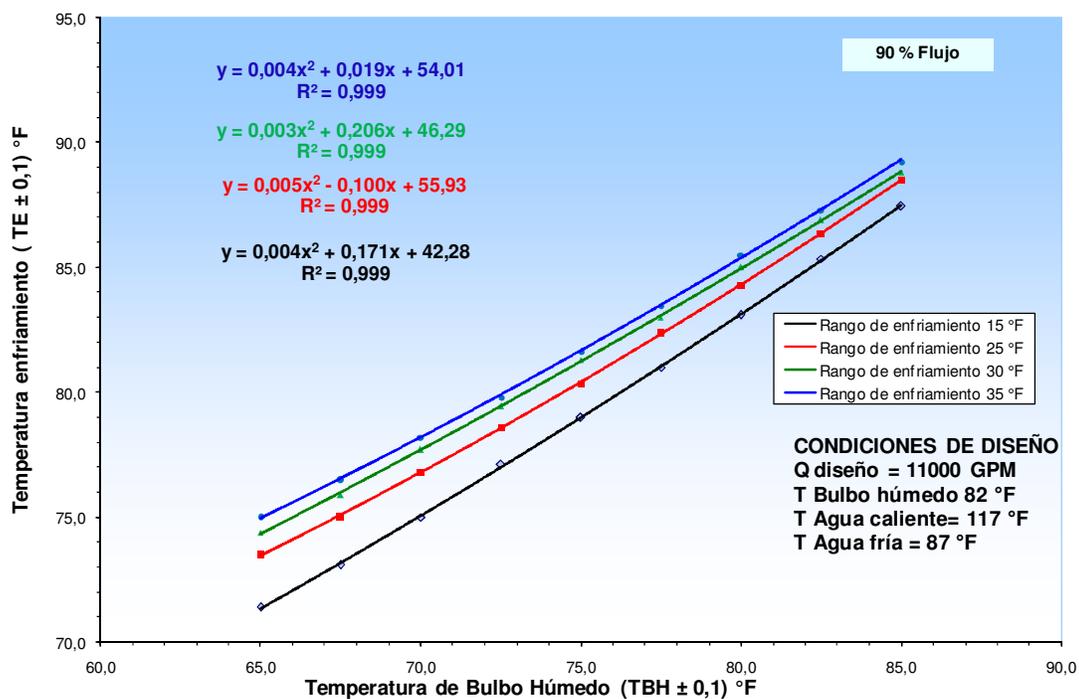


Figura D.2 Curva de comportamiento de la torre E-951 al 90% de su capacidad

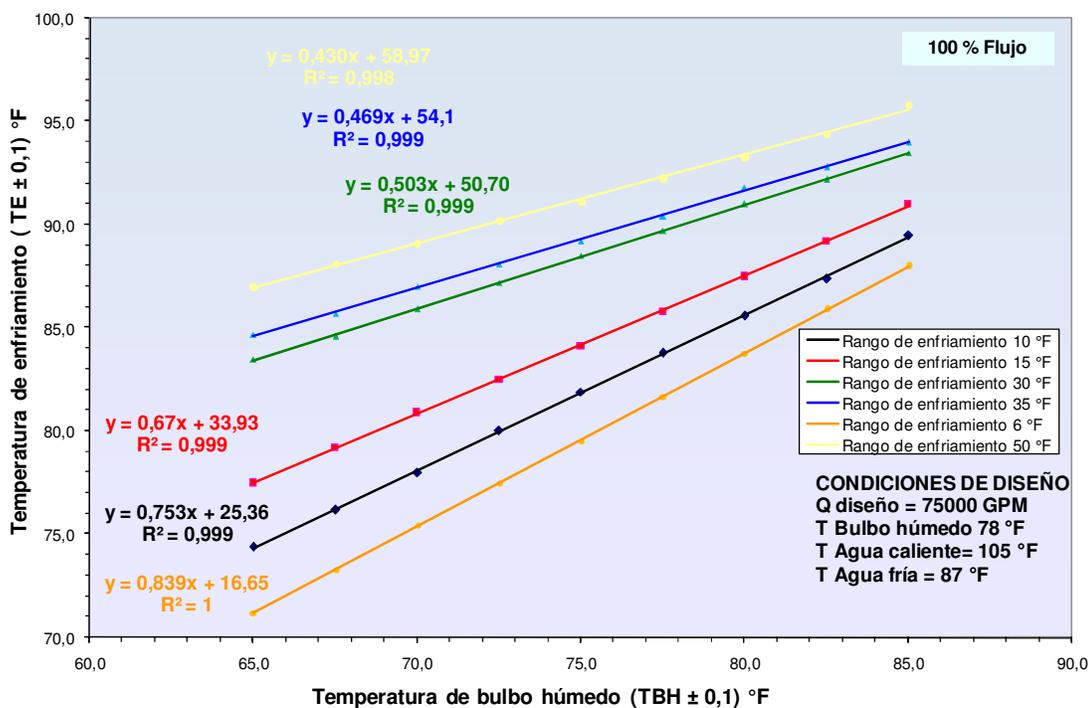


Figura D.3 Curva de comportamiento de la torre M-7154 al 100% de su capacidad

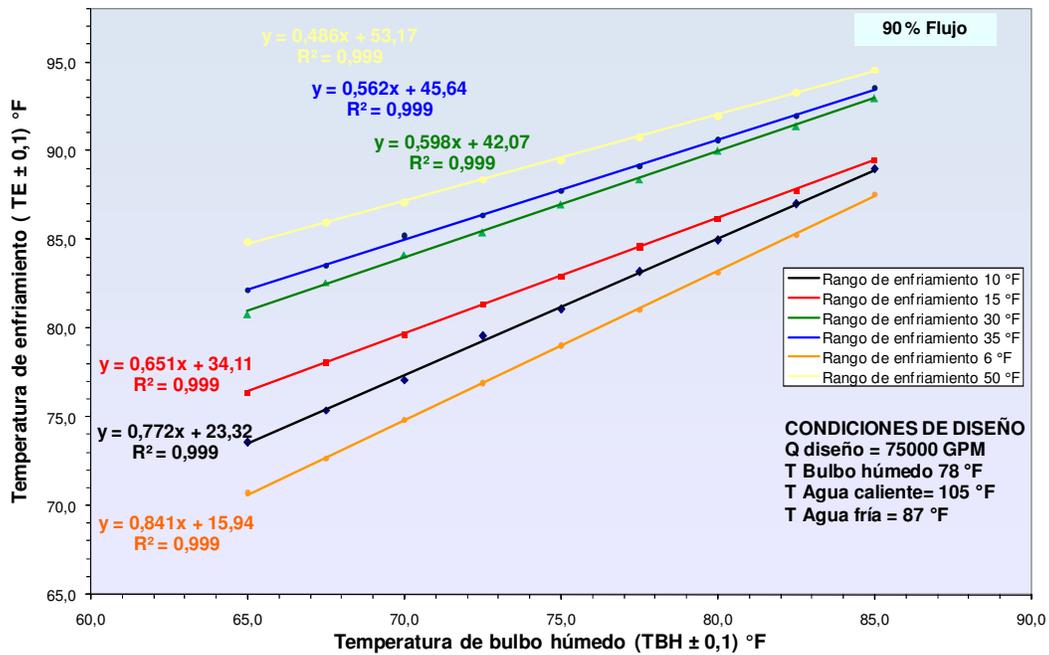


Figura D.4 Curva de comportamiento de la torre M-7154 al 90% de su capacidad

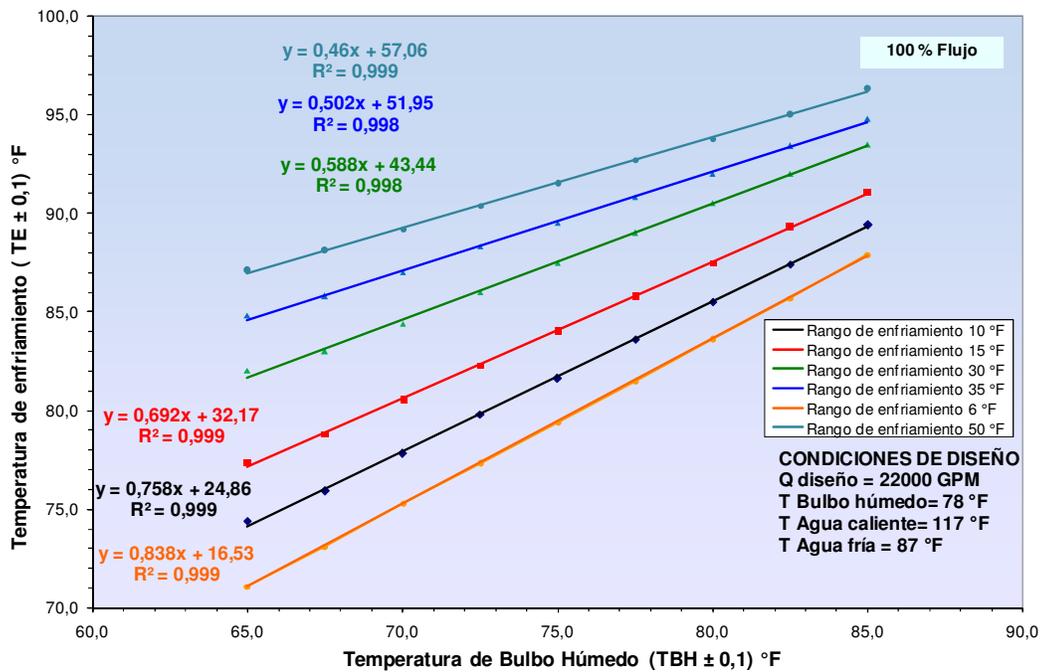


Figura D.5 Curva de comportamiento de la torre M-7156 al 100% de su capacidad

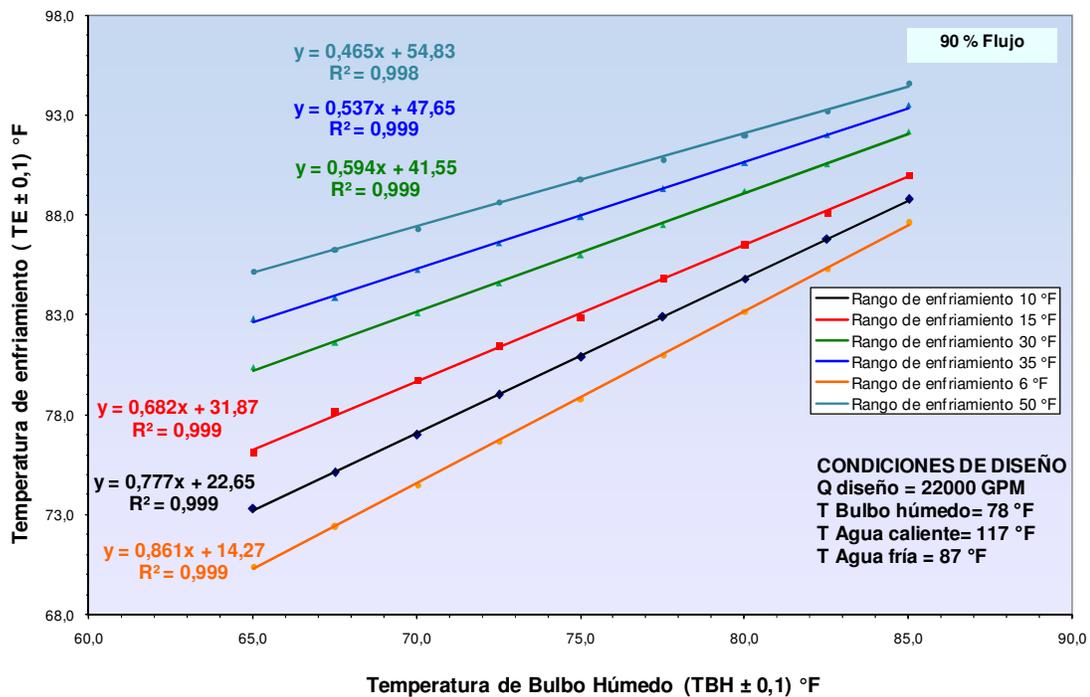


Figura D.6 Curva de comportamiento de la torre M-7156 al 90% de su capacidad

APÉNDICE E: TABLAS Y GRÁFICAS RESULTANTES

En esta sección se incluyen las tablas y gráficas concernientes a las temperaturas predichas mediante las curvas de comportamiento en función del rango de enfriamiento y las temperaturas de agua fría según la capacidad y del caudal concernientes a las torres de enfriamiento M-7154 y M-7156.

Tabla E.1 Temperaturas predichas mediante las curvas de comportamiento para la torre M-7154

Rango de Enfriamiento (°F)	90% Flujo Diseño (°F)	100% Flujo Diseño (°F)	110% Flujo Diseño (°F)
6	84,51	85,05	85,48
10	86,24	86,76	87,77
15	87,20	88,54	89,71
26	90,87	91,72	93,56
35	91,50	92,35	94,30
50	92,78	94,04	95,87

Tabla E.2 Temperaturas de agua fría para la Torre M-7154 según la capacidad

90% de capacidad	100% de capacidad	110% de capacidad
87,20 °F	88,54 °F	89,71 °F

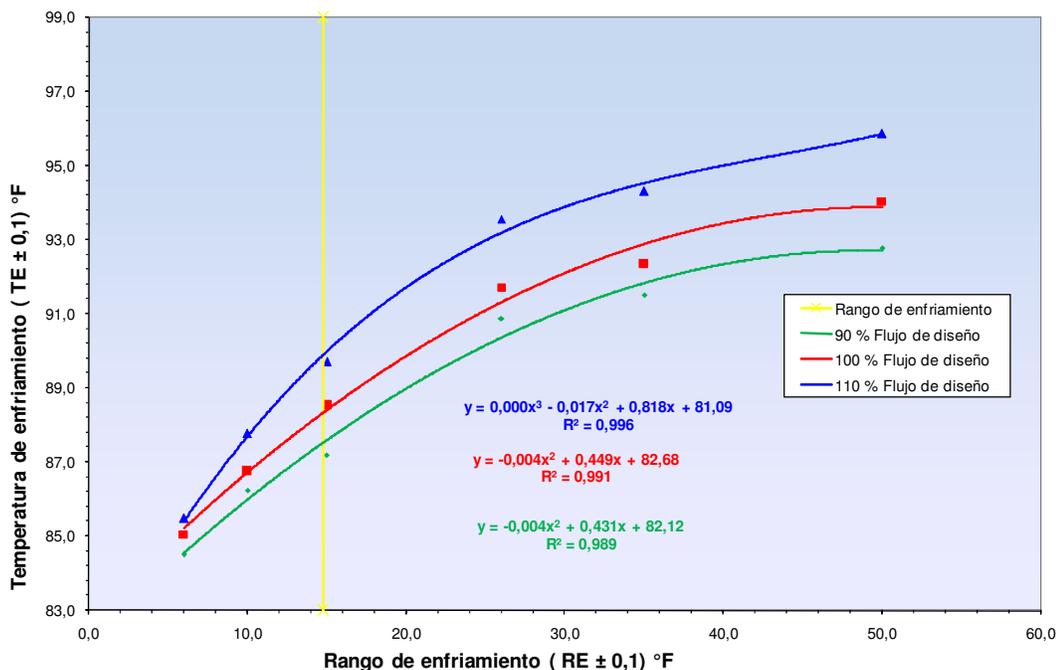


Figura E.1 Temperaturas predichas en función del rango de enfriamiento de la torre M-7154

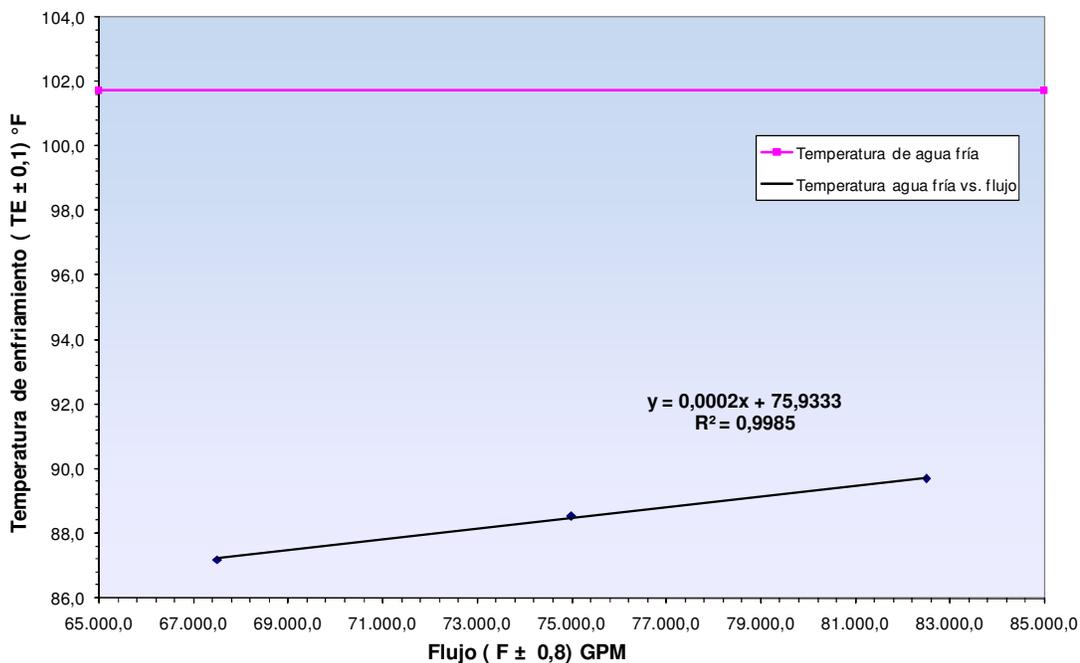


Figura E.2 Temperaturas de agua fría en función del caudal de la torre M-7154

Tabla E.3 Temperaturas predichas mediante las curvas de comportamiento para la torre M-7156

Rango de Enfriamiento (°F)	90% Flujo Diseño (°F)	100% Flujo Diseño (°F)	110% Flujo Diseño (°F)
6	84,04	84,47	84,76
10	85,62	86,26	86,74
15	87,18	88,23	88,76
26	89,69	91,07	91,87
35	91,21	92,61	93,44
50	92,56	94,33	95,16

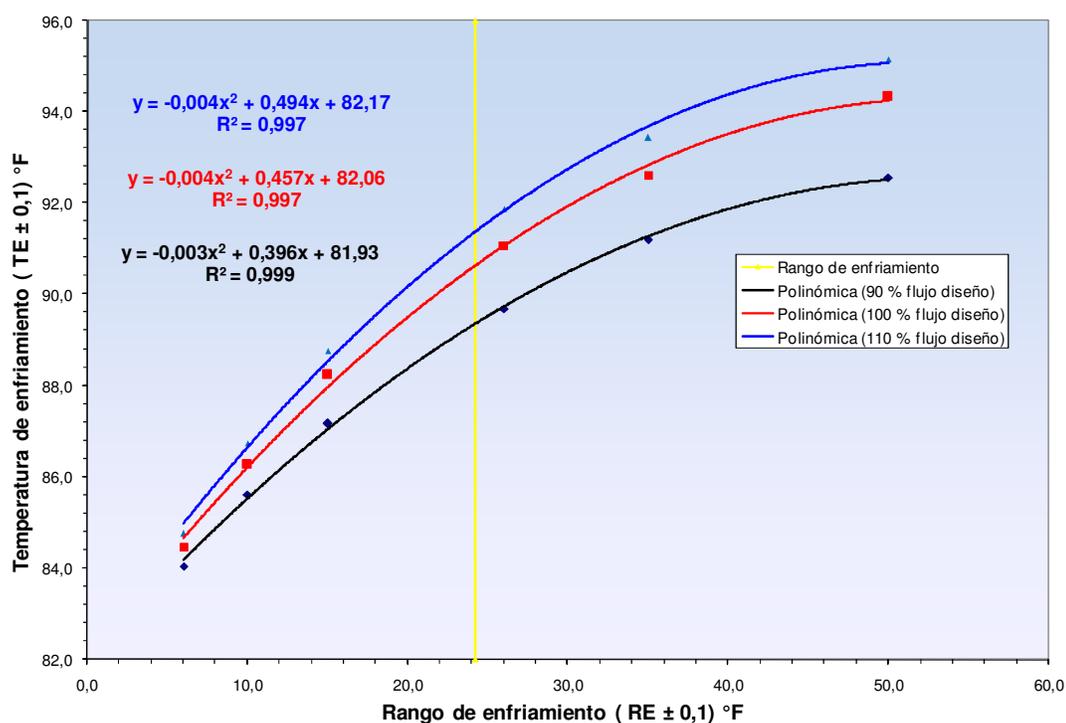


Figura E.3 Temperaturas predichas en función del rango de enfriamiento de la torre M-7156

Tabla E.4 Temperaturas de agua fría para la Torre M-7156 según la capacidad

90% de capacidad	100% de capacidad	110% de capacidad
89,36 °F	90,62 °F	91,39 °F

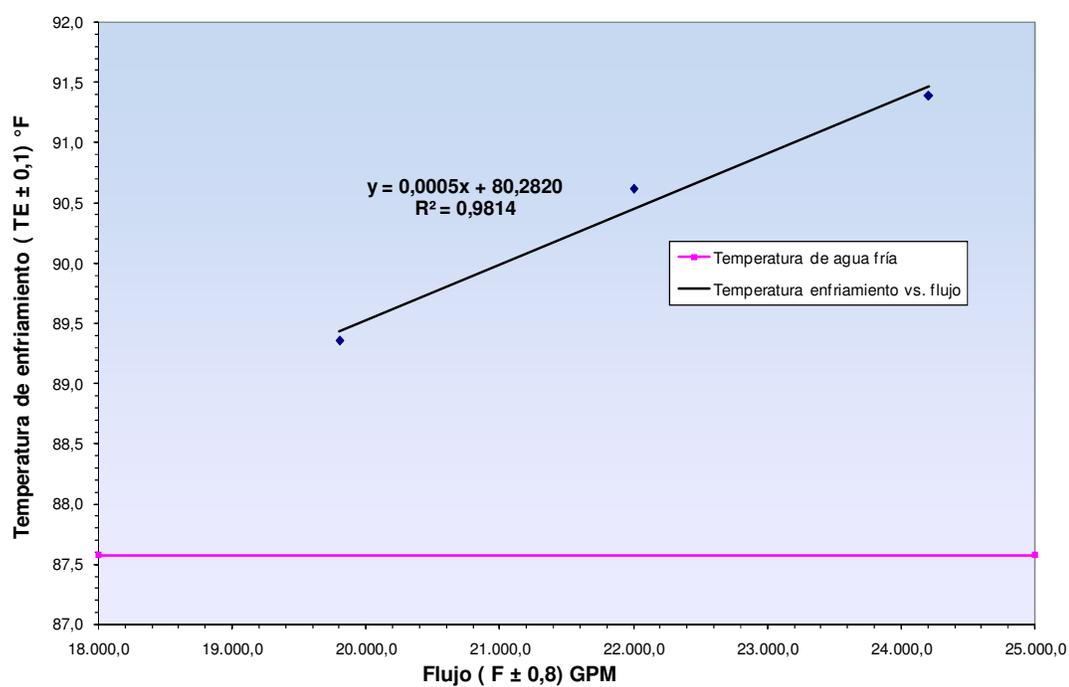


Figura E.4 Temperaturas de agua fría en función del caudal de la torre M-7156

APÉNDICE F: COTIZACIONES

En esta sección se incluyen las cotizaciones requeridas para el estimado de costo clase V.



C. E. Shepherd Company
 2221 CANADA DRY ST
 HOUSTON, TX 77023
 PH: 713.924.4300 / FAX: 713.928.2559
www.ceshepherd.com

PRO-FORMA INVOICE

DATE	NUMBER	PAGE
7/31/2012		1

nwhite@ceshepherd.com
jbel@ceshepherd.com
coolingtowemarts@ceshepherd.com

TO: PDVSA PETROLEO, S.A.
 AV. LIBERTADOR CON CALLE EL EMPALME,
 URB. LA CAMPINA, EDIF. PDVSA, TORRE ESTE
 PH, CARACAS - VENEZUELA
 ATTN: ING. JESUS GONZALEZ
 EMAIL: jesusegm@gmail.com

SHIP TO: PDVSA PETROLEO, S.A.
 AV. LIBERTADOR CON CALLE EL EMPALME,
 URB. LA CAMPINA, EDIF. PDVSA, TORRE ESTE
 PH, CARACAS - VENEZUELA
 ATTN: ING. JESUS GONZALEZ
 EMAIL: jesusegm@gmail.com

ORDER #	QUOTE VALIDITY	CUST #	SALES PERSON	PURCHASE ORDER #	SHIP VIA	↑ EST. SHIP DATE	TERMS
QUOTE	30 DAYS		RANDY WHITE	QUOTE	AIRE'S FREIGHT SYSTEM	8-10 WEEKS A.R.O.	WIRE TRANSFER OR CREDIT CARD

QUANTITY	DESCRIPTION	UNIT PRICE	UNIT OF MEASURE	AMOUNT
542,537	4x72" GULLWING #GW472-6N	\$0.96	EACH	\$520,835.52
NOTE: Pricing is based on ALL quantities purchased; Should the quantities change, we will need to Re-quote the pricing.				
THIS MATERIAL WILL CONSIST OF (16) 40'HC CONTAINERS.				
ESTIMATED TRANSIT TIME: (15) DAYS				
APPROX. (376) CRATES				
DIMS: 78"L x 45"W x 49"H				

WIRE TRANSFER INFORMATION:
 AMEGY BANK OF TEXAS
 13430 NW FREEWAY
 HOUSTON, TEXAS 77040 USA
 TEL: (713) 232.1512
 C.E.SHEPHERD CO., L.P.
 ACCOUNT NO: 0051045261
 BANK FED. NUMBER: 113011258
 SWIFT CODE: SWBKUS44
 TEL: (713) 924.4300, ATTN: JO STALLINGS

SUB TOTAL	\$520,835.52
* PACKAGING	0
** ESTIMATED FREIGHT	\$41,811.03
*** PROCESSING FEE	0
INCOTERMS 2010	CF - PUERTO CABELLO VENEZUELA
TOTAL USD	\$562,646.55
PAYMENT RECEIVED	
BALANCE DUE	

PLEASE PROVIDE A COPY OF YOUR TAX FORM IF EXEMPT
 PLEASE CONFIRM YOUR ORDER BY FAX OR E-MAIL, THANK YOU

*PACKAGING - CRATING AND/OR PALLETIZING CHARGE (\$MP-15 COMPLIANT)
 ** A \$50 EXPEDITING FEE WILL BE CHARGED FOR ANY ORDER THAT REQUIRE SAME DAY SHIPPING
 *** THE FREIGHT AMOUNT PROVIDED IN THIS QUOTATION IS ONLY AN ESTIMATE AND IS ONLY VALID FOR FIFTEEN BUSINESS DAYS. THE FINAL CHARGES WILL BE DETERMINED BY ACTUAL SHIPMENT CHARACTERISTICS AT THE TIME OF SHIPPING.
 **** ALL CREDIT CARD ORDERS WILL HAVE A 4% PROCESSING FEE - WIRE TRANSFERS WILL HAVE A \$25.00 USD PROCESSING FEE.
 ***** LEAD TIME SUBJECT TO CHANGE DEPENDING ON RECEIPT OF PURCHASE ORDER AND OTHER INCOMING ORDERS.

WE NOW ACCEPT MASTERCARD, VISA, AMERICAN EXPRESS AND DISCOVER!



Conditions: The price and terms on this quotation are not subject to verbal changes or other agreements unless approved in writing by the CESCO. All quotations and agreements are contingent upon strike, accidents, fires, availability of material, and all other causes beyond our control. Prices are based on costs and conditions existing on the date of quotation and are subject to change by CESCO before final acceptance. Typographical and stenographic errors are subject to correction. Conditions not specifically stated herein shall be governed by established trade customs. Terms inconsistent with those stated herein, which may appear on the Purchaser's formal order, will not be binding to CESCO.