

ESTUDIO DE LAS CONDICIONES ACTUALES DE LA TORRE ENFRIADORA  
TE-4401 DE LA REFINERÍA DE ECOPETROL EN BARRANCABERMEJA Y  
RECOMENDACIONES PARA OPTIMIZAR SU EFICIENCIA

AURA MARÍA FLÓREZ REYES  
SARA JULIANA VARGAS VARGAS

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA

2016

ESTUDIO DE LAS CONDICIONES ACTUALES DE LA TORRE ENFRIADORA  
TE-4401 DE LA REFINERÍA DE ECOPETROL EN BARRANCABERMEJA Y  
RECOMENDACIONES PARA OPTIMIZAR SU EFICIENCIA

AURA MARÍA FLÓREZ REYES  
SARA JULIANA VARGAS VARGAS

Trabajo de grado presentado como requisito para optar por el título de:  
Ingeniera Química

Director:  
Crisóstomo Barajas Ferreira  
Ing. Químico MSc.

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA

2016

## DEDICATORIA

*A Dios por sus grandes bendiciones.*

*A mi abuelito Chepe, quien se fue unos meses antes de ver el resultado final pero desde el cielo me sigue llenando de amor. Siempre será mi hombre favorito.*

*A mis padres que son mi eterno amor y fiel apoyo, infinitas gracias por todo.*

*A mis hermanas que me regalan tantas alegrías y momentos únicos en la vida.*

*A Sara, la mejor compañera y amiga por apoyarme, quererme y tenerme tanta paciencia durante este camino.*

*A mis amigos que estuvieron siempre conmigo, especialmente a Julián V.*

*A Daniel, quien siempre tiene una sonrisa para alegrarme los días.*

*A cada uno de los integrantes del departamento de Cracking II por tantas enseñanzas y momentos especiales.*

*A Carlos Meza y Leonardo Bayona por convertirse en los mejores tutores que pude tener y brindarme su amistad, gracias por tanto.*

*A Jorge H, Jauregui, Jhon M, Henry y Fabián por compartir conmigo una de las mejores experiencias como practicante en la refinería y regalarme su amistad.*

***Aura María Flórez Reyes.***

## DEDICATORIA

*A mis padres por su infinito amor y esfuerzo.*

*A mis hermanas por ser un apoyo incondicional. Andrea por ser mi ejemplo a seguir. Marianna por alegrar siempre mis días.*

*A mis amigos de la Universidad por ser mi familia durante estos años, los llevo en mi corazón, en especial Auri por estar conmigo durante los momentos más difíciles y siempre escucharme.*

**Sara Juliana Vargas Vargas.**

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad Industrial de Santander por brindarnos la posibilidad de crecer académica y personalmente.

Al departamento de Cracking II por permitirnos llevar a cabo este proyecto, ofreciendo siempre total colaboración y valiosos aportes.

A Leonardo Bayona por compartirnos sus preciados conocimientos llenos de paciencia y cariño, siempre dispuesto a ayudarnos como un verdadero amigo.

A Carlos Meza por proponernos la idea de desarrollar este proyecto que nos dejaría tantas enseñanzas.

A Omar Benavides por su oportuna ayuda que nos permitió mejorar y prepararnos para finalizar esta meta.

A la empresa Nalco por facilitarnos la información y los equipos de medición que requerimos en su momento.

A Crisóstomo Barajas por su guía.

A nuestras familias y amigos por su incondicional apoyo y cariño en cada etapa de este proceso.

## TABLA DE CONTENIDO

	Pág
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>19</b>
<b>1. CONCEPTOS TEÓRICOS.....</b>	<b>21</b>
1.1 TORRES DE ENFRIAMIENTO .....	21
1.2 TEORÍA DE MERKEL.....	21
<b>2. DESCRIPCIÓN DE DISEÑO DE LA TORRE .....</b>	<b>23</b>
<b>3. METODOLOGÍA.....</b>	<b>25</b>
3.1 REVISIÓN CUALITATIVA DEL ESTADO ACTUAL DE LA TORRE ENFRIADORA TE-4401.....	25
3.2 RECOPIACIÓN DE DATOS DE DISEÑO .....	25
3.3 DETERMINACIÓN DEL L/G .....	26
3.4 APLICACIÓN DE LA TEORÍA DE MERKEL Y MÉTODO DE TCHEBYCHEFF .....	28
3.4.1 Aplicación de la teoría de Merkel.....	28
3.4.2 Aplicación del método de Tchebycheff .....	29
3.5 CÁLCULO DE LAS CURVAS CARACTERÍSTICAS .....	32
3.6 CÁLCULO DE LA EFICIENCIA.....	33
3.6.1 Eficiencia de las curvas características .....	33
3.6.1.1 Constante de las curvas de operación .....	33
3.6.1.2 Constante de las curvas de diseño .....	34
3.6.1.3 Curvas de operación, diseño y características. ....	34
3.6.2 Eficiencia de retiro de calor .....	36
3.6.2.1 Cálculo del calor removido de la torre enfriadora. ....	36

3.6.3 Eficiencia con respecto al L/G .....	37
<b>4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....</b>	<b>39</b>
4.1 EFICIENCIA DE ACUERDO AL L/G DE DISEÑO Y EL L/G DE OPERACIÓN.....	39
4.2 EFICIENCIA DE LA TORRE ENFRIADORA TE-4401 DE ACUERDO AL RETIRO DE CALOR.....	39
4.3 EFICIENCIA DE LA TORRE ENFRIADORA TE-4401 DE ACUERDO LA CURVA CARACTERÍSTICA.....	40
<b>5. RECOMENDACIONES.....</b>	<b>42</b>
<b>6. CONCLUSIONES.....</b>	<b>44</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....</b>	<b>46</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>48</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>50</b>

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág</b>
<b>Tabla 1.</b> Temperatura del agua en la entrada y salida de la torre.....	25
<b>Tabla 2.</b> Condiciones de operación.....	26
<b>Tabla 3.</b> Cálculo del L/G.....	28
<b>Tabla 4.</b> Cálculo de la temperatura por el método de Tchebycheff.....	29
<b>Tabla 5.</b> Valores de hw.....	30
<b>Tabla 6.</b> Cálculo de h2.....	30
<b>Tabla 7.</b> Valores de ha.....	30
<b>Tabla 8.</b> Fuerza impulsora.....	31
<b>Tabla 9.</b> Valores de KaV/L.....	31
<b>Tabla 10.</b> Cálculo de la constante de las curvas de operación.....	33
<b>Tabla 11.</b> Eficiencia de las curvas características.....	36
<b>Tabla 12.</b> Eficiencia con respecto al calor de diseño.....	36
<b>Tabla 13.</b> Eficiencia de retiro de calor.....	37
<b>Tabla 14.</b> Eficiencia con respecto al L/G.....	38
<b>Tabla 15.</b> Datos de campo 8:00 am.....	51
<b>Tabla 16.</b> Datos de campo 2:00 pm.....	51
<b>Tabla 17.</b> Datos de campo 5:00 pm.....	51
<b>Tabla 18.</b> Especificaciones de cada celda.....	51
<b>Tabla 19.</b> Datos de temperatura de retorno.....	52
<b>Tabla 20.</b> Promedio de temperatura de retorno.....	52
<b>Tabla 21.</b> Temperatura de salida del agua.....	52
<b>Tabla 22.</b> Temperatura de bulbo seco y húmedo del aire a la entrada.....	53
<b>Tabla 23.</b> Humedad relativa.....	53
<b>Tabla 24.</b> Amperaje y voltaje de los ventiladores.....	53
<b>Tabla 25.</b> Temperatura de succión y descarga de la bomba MP-4405A/B.....	53
<b>Tabla 26.</b> Temperatura promedio de succión y descarga de la bomba MP-4405 A/B.....	53
<b>Tabla 27.</b> Ángulo de inclinación de las aspas de los ventiladores.....	54

<b>Tabla 28.</b> Intensidad de corriente eléctrica de los ventiladores. ....	54
<b>Tabla 29.</b> Cálculo de la curva característica TE-4401. ....	56
<b>Tabla 30.</b> Cálculo de la curva característica de la Celda "A" .....	56
<b>Tabla 31.</b> Cálculo de la curva característica de la celda "B". ....	57
<b>Tabla 32.</b> Cálculo de la curva característica de la celda "C". ....	57
<b>Tabla 33.</b> Cálculo de la curva característica de la Celda "D". ....	58
<b>Tabla 34.</b> Cálculo de la curva característica de la celda "F".....	58
<b>Tabla 35.</b> L/G y KaV/L característico, de diseño y de operación de TE-4401. ....	59
<b>Tabla 36.</b> L/G y KaV/L característico, de diseño y de operación de la Celda "A". ....	59
<b>Tabla 37.</b> L/G y KaV/L característico, de diseño y de operación de la Celda "B". ....	60
<b>Tabla 38.</b> L/G y KaV/L característico, de diseño y de operación de celda "C". ....	60
<b>Tabla 39.</b> L/G y KaV/L característico, de diseño y de operación de la Celda "D". ....	61
<b>Tabla 40.</b> L/G y KaV/L característico, de diseño y de operación de la Celda "F". ....	61

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág</b>
<b>Figura 1.</b> Diagrama de la fuerza motriz.....	22
<b>Figura 2.</b> Metodología.....	25
<b>Figura 3.</b> Torre enfriadora TE-4401.....	26
<b>Figura 4.</b> Curva característica TE-4401.....	32
<b>Figura 5.</b> Curvas características de las celdas de la torre TE-4401. ....	33
<b>Figura 6.</b> Curva de diseño, característica y de operación de la torre TE-4401.....	34
<b>Figura 7.</b> Curva de diseño, característica y de operación de la celda "A". ....	34
<b>Figura 8.</b> Curva de diseño, característica y de operación de la celda "B" .....	35
<b>Figura 9.</b> Curva de diseño, característica y de operación de la celda "C". ....	35
<b>Figura 10.</b> Curva de diseño, característica y de operación de la celda "D" .....	35
<b>Figura 11.</b> Curva de diseño, característica y de operación de la celda "F" .....	35
<b>Figura 12.</b> Eficiencia con respecto al L/G.....	39
<b>Figura 13.</b> Eficiencia de retiro de calor. ....	39
<b>Figura 14.</b> Eficiencia de la curva característica. ....	40

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág</b>
ANEXO A. QUÍMICA DE NALCO Y DOSIFICACIÓN.....	50
ANEXO B. DATOS DE CAMPO.....	51
ANEXO C. ÁNGULO DE INCLINACIÓN DE LAS ASPAS.....	54
ANEXO D. MÉTODO DE TCHEBYCHEFF.....	55
ANEXO E. CÁLCULO DE LOS VALORES DE $KaV/L$ PARA LAS CURVAS CARACTERÍSTICAS.....	56
ANEXO F. VALORES DE $KaV/L$ CARACTERÍSTICO, DE DISEÑO Y DE OPERACIÓN DE TE-4401.....	59

## LISTA DE VARIABLES

a	Superficie interfacial por unidad de volumen	[ft <sup>2</sup> /ft <sup>3</sup> ]
C	Constante de proporcionalidad	Adimensional
Cp <sub>L</sub>	Calor específico del líquido	[BTU/lb.°F]
E	Entalpía de la fase gaseosa.	[BTU/lb]
Ea	Entalpía de la temperatura de bulbo húmedo del aire medida a una distancia de la torre en dirección contraria del viento.	[BTU/lb]
Eao	Entalpía de salida del aire en términos de bulbo seco.	[BTU/lb]
Ewb	Entalpía de entrada del aire en términos de bulbo húmedo	[BTU/lb]
G	Flujo de aire	[lb/h]
G'	Flujo de gas seco	[lb/h]
ha	Entalpía del aire	[BTU/lb]
H <sub>L</sub>	Entalpía del líquido	[BTU/lb]
H <sub>L1</sub>	Entalpía del líquido a la entrada de la torre	[BTU/lb]
H <sub>L2</sub>	Entalpía del líquido a la salida de la torre	[BTU/lb]
hw	Entalpía del agua	[BTU/lb]
K	Coefficiente de transferencia de masa	[lb/ft <sup>2</sup> .h]
KaV/L	Número de Merkel	Adimensional
L	Flujo de agua	[lb/h]
L <sub>1</sub>	Flujo de líquido que entra a la torre	[lb/h]
L <sub>2</sub>	Flujo de líquido que sale de la torre	[lb/h]
n	Constante que depende del relleno de la torre	Adimensional
Q	Flujo de calor	[MBTU/h]
Tbh	Temperatura de bulbo húmedo del aire que ingresa a la torre	[°F]
Tbs	Temperatura de bulbo seco del aire a la entrada de la torre	[°F]
Tea	Temperatura de bulbo húmedo del aire medida a una distancia de la torre en dirección contraria del viento.	[°F]
Tcw	Temperatura del agua fría	[°F]

Teao	Temperatura del aire a la salida de la torre	[°F]
Thw	Temperatura del agua caliente	[°F]
T <sub>L</sub>	Temperatura del líquido	[°F]
V	Volumen activo por unidad de superficie de relleno de la torre	[ft <sup>3</sup> ]
Y <sub>1</sub>	Humedad másica de aire seco	[lb H <sub>2</sub> O/lb aire]
Y <sub>2</sub>	Humedad másica de aire húmedo	[lb H <sub>2</sub> O/lb aire]

## RESUMEN

**TÍTULO:** ESTUDIO DE LAS CONDICIONES ACTUALES DE LA TORRE ENFRIADORA TE-4401 DE LA REFINERÍA DE ECOPETROL EN BARRANCABERMEJA Y RECOMENDACIONES PARA OPTIMIZAR SU EFICIENCIA\*

**AUTOR:** AURA MARÍA FLÓREZ REYES; SARA JULIANA VARGAS VARGAS\*\*

**PALABRAS CLAVE:** Torre enfriadora, Teoría de Merkel, Método de Tchebycheff, Eficiencia, Curva Característica.

**DESCRIPCIÓN:** La energía es un recurso valioso que no puede ser derrochado. Las torres de enfriamiento son dispositivos desarrollados para disipar grandes cantidades de energía a un costo razonable. La torre enfriadora TE-4401 del departamento de Craqueo Catalítico II de la refinería de Barrancabermeja actualmente evidencia un alto consumo de energía por el funcionamiento continuo de la totalidad de sus ventiladores, por lo tanto, se decide realizar un diagnóstico termodinámico y presentar una serie de recomendaciones que permitan optimizar su eficiencia global y, de esta forma, contribuir a un ahorro energético del proceso.

Para esto se obtuvo la relación líquido/gas (L/G) y las curvas características de la torre TE-4401 y sus respectivas celdas, así como el número de Merkel (KaV/L) usando el método numérico de Tchebycheff y se analizaron las condiciones térmicas en las que se encuentra la torre actualmente. Se encontró que la torre disipa la totalidad de la energía que recibe, siendo influenciada por la relación KaV/L y sus condiciones físicas, sin embargo, para conocer una aproximación de lo que sería su desempeño óptimo, la relación L/G brinda un acercamiento de los flujos que proporcionan la mejor eficiencia. Prolongar el buen funcionamiento de la torre depende de un mantenimiento continuo y preventivo de esta.

---

\* Trabajo de Grado.

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Msc. Crisóstomo Barajas Ferreira.

## ABSTRACT

**TITLE:** STUDY OF CURRENT STATUS OF THE COOLING TOWER TE-4401 AT ECOPETROL'S REFINERY IN BARRANCABERMEJA AND RECOMMENDATIONS FOR OPTIMIZE ITS EFFICIENCY\*

**AUTHOR:** AURA MARÍA FLÓREZ REYES; SARA JULIANA VARGAS VARGAS\*\*

**KEY WORDS:** Cooling tower, Merkel's Theory, Tchebycheff's method, Efficiency, Characteristic curve.

**DESCRIPTION:** Energy is a valuable resource that can not be wasted. Cooling towers are equipments developed to dissipate large amounts of energy at a reasonable cost. Cooling tower at the Catalytic Cracking II of Barrancabermeja's refinery actually evidences high consumption of energy by the continuous operation of all of its fans, therefore, it was decided to perform a thermodynamic diagnosis and present recommendations to optimize its overall efficiency and, thus, contributing to an energy saving in the process.

The liquid/gas relation (L/G), the characteristic curve of the tower TE-4401 and their respective cells were obtained. Merkel's number (KaV/L) was also obtained using Tchebycheff's numeric method, and the current thermic conditions of the tower were analyzed. It was found that the tower dissipates all the energy it receives, being influenced by the KaV/L ratio and physical conditions, however, to find an approximation of what would be its optimum performance, the ratio L/G provides flows that must give the best efficiency. Prolonging the proper functioning of the tower depends on a continuous and preventive maintenance of this.

---

\*Bachelor Thesis.

\*\*Physical-Chemical Engineering Faculty. Chemical Engineering School. Advisor: Msc. Crisóstomo Barajas Ferreira.

## INTRODUCCIÓN

La torre enfriadora TE-4401 del complejo de la Gerencia Refinería de Barrancabermeja fue construida en el año 1945 con el propósito de asegurar, de manera autónoma, el suministro de agua de enfriamiento para abastecer las necesidades del departamento de Cracking II constituido por tres unidades: URC\_UOPII, Azufre III y Lado frío.

El diseño de la torre enfriadora TE-4401 estipula que debe operar con cinco ventiladores en servicio y uno disponible en caso de necesitar relevo, actualmente la torre ha estado en operación continua con seis ventiladores por posible baja transferencia térmica y deterioro interno de la torre, generando así, un alto consumo energético. Se encontró que la torre enfriadora presenta oportunidades de mantenimiento en válvulas, tuberías de retorno, rejillas de atrapa neblina y relleno, entre otros. Por lo tanto, es necesario evaluar el impacto en la eficiencia térmica de la torre enfriadora TE-4401.

Para evaluar las condiciones térmicas en las que se encuentra la torre actualmente fue necesario realizar balances de masa y energía y, de esta manera, determinar la relación líquido/gas (L/G), además, se utilizó el método numérico de Tchebycheff para calcular el número de Merkel ( $KaV/L$ ) y posteriormente obtener las curvas características, de operación y diseño de la torre TE-4401 y de cada celda. Una vez obtenida esta información fue posible determinar el porcentaje de eficiencia según las curvas características, según el retiro de calor y respecto a la relación L/G.

El desempeño de la torre enfriadora TE-4401 se ve afectado principalmente por la relación  $KaV/L$ , el rango, la relación L/G y las condiciones físicas de la torre. Para garantizar que la torre trabaje en estado óptimo, se debe procurar manejar una relación L/G cercana a 1,42 que es el punto de intersección de la curva característica y de operación.

Conociendo la eficiencia térmica de la torre enfriadora TE-4401 se observó que presenta baja remoción de calor debido a que la energía generada por las tres unidades de Cracking II, bajo las condiciones actuales, es 205,36 MBTU/h y la torre puede retirar hasta 684 MBTU. La baja generación de energía por parte de las unidades de Cracking II se debe a la escasa carga de hidrocarburos que actualmente recibe la refinería, además del ensuciamiento interno de las unidades por estar en la fase final del tiempo de corrida estipulado.

Este problema aumenta por el deterioro interno de la torre enfriadora, por tal razón se plantean recomendaciones basadas en hallazgos de campo y resultados obtenidos que permitan optimizar su eficiencia y, de esta manera, conseguir la operación continua y adecuada con máximo cinco ventiladores en servicio, contribuyendo así a un ahorro energético en el proceso.

## 1. CONCEPTOS TEÓRICOS

### 1.1 TORRES DE ENFRIAMIENTO

La torre enfriadora TE-4401 tiene por diseño seis celdas de tiro inducido, es decir, el ventilador se encuentra en la parte superior y aspira el aire a través de la torre [1] [2], tiene la capacidad total instalada de 45.600 gpm; el agua de restitución es agua clarificada proveniente de la unidad U-800 y U-850. La torre suministra el agua de enfriamiento a través de tres bombas que manejan un flujo de diseño de descarga de 17.000 gpm cada una y con una presión de 76 psig; adicionalmente, según el diseño, la temperatura del agua de retorno a las celdas es de 120 °F y la salida es de 90 °F, el retiro energético de la torre es de 684 MBTU/h.

El aire se satura de humedad a medida que asciende en el interior de la torre y tiene un contacto íntimo con el agua que desciende, el calor latente de vaporización de la fase gaseosa aumenta debido a la energía cedida por el agua al aire, disminuyendo así, la temperatura de la fase líquida hasta un valor máximo igual a la temperatura de bulbo húmedo del ambiente. [3] [4] En las diferentes fechas de toma de datos (26,29 de Febrero, 1,2,3 de Marzo y 4, 5 de Abril), la torre estaba operando con cinco de los seis ventiladores disponibles, ya que el ventilador SUE-4401E tenía un escape de aceite en el reductor y tuvo que ser sacado de servicio, sin embargo, la válvula del agua de retorno a la celda E, se mantuvo abierta por encontrarse en falla.

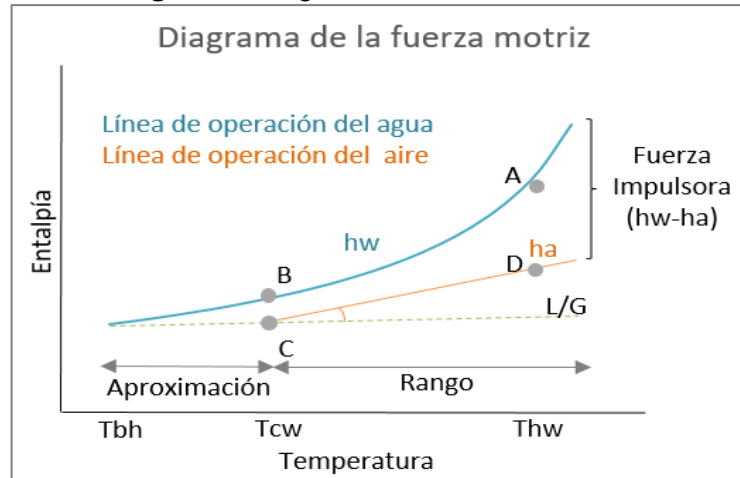
### 1.2 TEORÍA DE MERKEL

Merkel, en 1925, combinó por primera vez el proceso de transferencia de masa y calor sensible en un coeficiente global basado en la diferencia de entalpía como fuerza impulsora [2]. Esta transferencia de masa y calor es representada por la siguiente ecuación:

$$\frac{KaV}{L} = \int_{T_{hw}}^{T_{cw}} \frac{dt}{E_{ao} - E_{wb}} \quad (1)$$

El lado izquierdo de la ecuación indica el grado de dificultad para enfriar el agua. Valores pequeños de  $KaV/L$  con respecto al valor de diseño indican una alta eficiencia en el equipo.

**Figura 1.** Diagrama de la fuerza motriz



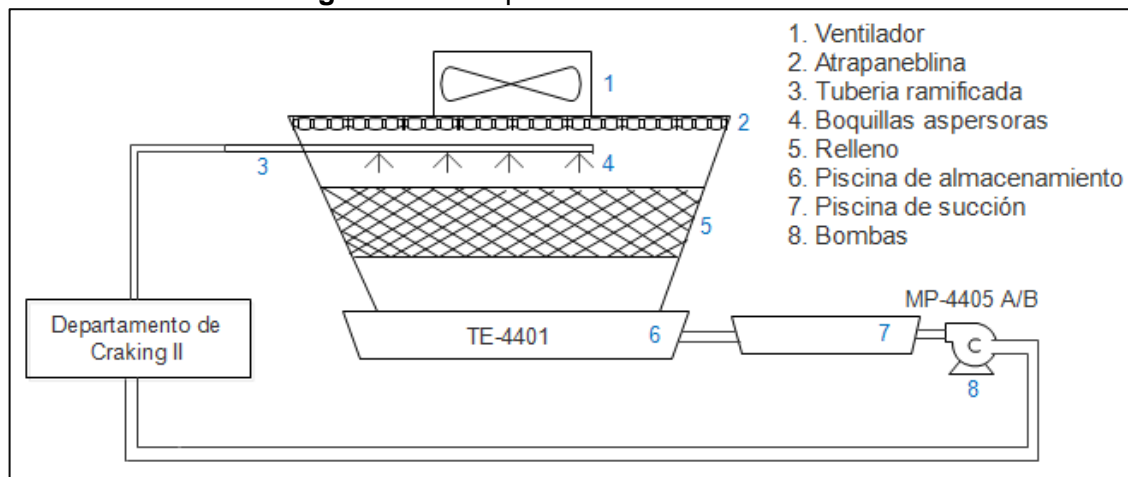
Modificado de: [5]

En la figura 1 se muestra el diagrama de la fuerza motriz, la curva superior muestra la relación entre la temperatura y la entalpía de aire saturado. Merkel asume que las gotas que caen a través de la torre están rodeadas de una película de aire saturado y la transferencia de calor y masa se lleva a cabo en dicha película, la cual tiene la misma temperatura del agua. El estado de la película de aire es representado por la línea naranja y se encuentra limitado por la temperatura caliente y fría del agua (Puntos A y B respectivamente). La curva inferior se conoce como línea de operación del aire, representa el aire fluyendo a través de la torre enfriadora, el origen es el punto C y su entalpía corresponde a la temperatura de bulbo húmedo en la entrada de la torre. A medida que el agua se enfría un grado ( $^{\circ}F$ ), la entalpía se incrementa 1 BTU multiplicado por  $L/G$ , por lo tanto, la relación  $L/G$  es la pendiente línea C-D. [5] [6] [7]

La fuerza impulsora en cualquier punto es la distancia vertical entre las dos líneas de operación y el rendimiento exigido a la torre es la inversa de esta diferencia.

## 2. DESCRIPCIÓN DE DISEÑO DE LA TORRE

Figura 2. Descripción del diseño de la torre



La torre enfriadora TE-4401 consta de seis celdas cada una con un ventilador eductor. Bajo cada ventilador se encuentra una capa de malla eliminadora de rocío, conocida como atrapanebolina, y debajo de esta se encuentran los ramales de tubería por donde ingresa el agua caliente la cual se distribuye por 144 boquillas que tiene cada celda para posteriormente caer sobre un relleno de polipropileno tipo salpique. La torre tiene un relleno que consta de capas de rejillas que se encargan de pulverizar el agua para aumentar el área de contacto.

El agua caliente desciende por la torre en forma de gotas teniendo un contacto íntimo con el aire que sube en contracorriente por educación del ventilador dando lugar a una transferencia de calor y masa enfriando el agua a una temperatura igual o menor a la temperatura de bulbo seco del aire y alcanzando, máximo, una temperatura igual a la temperatura de bulbo húmedo del aire.

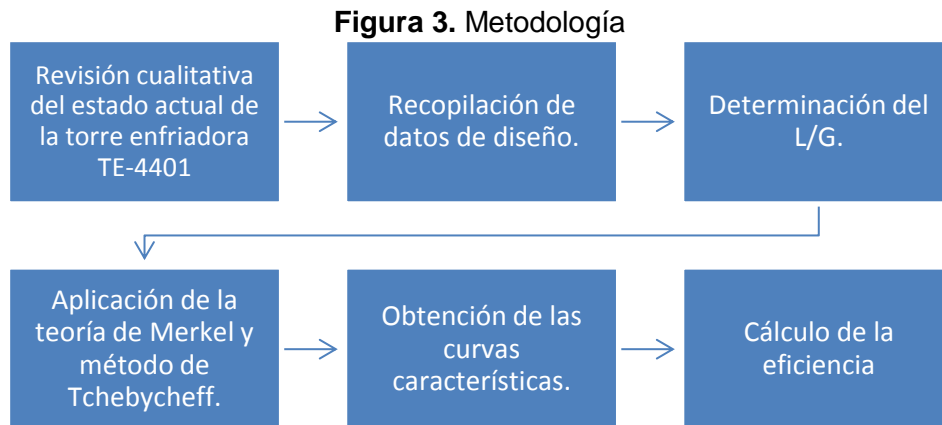
El proceso de transferencia de calor y humidificación finaliza cuando el agua cae a la piscina de cada celda y el aire caliente saturado sale por la parte superior de los conos de cada ventilador. El agua finalmente pasa a la piscina de succión de las bombas MP-4405A/B operadas por motor, la NP-4405C operada por turbina permanece en arranque automático y se utiliza en caso de requerir relevo de

aquellas que se encuentran en servicio. El flujo de descarga de las bombas es 17 Kgpm cada una, con una presión de 80 psig.

Para asegurar la calidad del agua y evitar el daño en equipos de transferencia térmica en las unidades se requiere de controles químicos y microbiológicos, en el caso de la torre TE-4401 se tiene un contrato externo que debe asegurar el control de los niveles de corrosión, al igual que el tratamiento microbiológico. Se utiliza una serie de químicos con su respectiva dosificación. Ver ANEXO A

### 3. METODOLOGÍA

En la figura 2 se muestra la metodología abordada para realizar la evaluación de la torre enfriadora TE-4401.



#### 3.1 Revisión cualitativa del estado actual de la torre enfriadora TE-4401

Durante siete días, con un pirómetro digital infrarrojo “TKTL 10 de lectura directa” se tomaron datos en campo de temperatura de agua de retorno a cada celda de la torre, temperatura de agua en la succión y descarga de las bombas MP-4405A/B, temperatura de agua fresca de restitución a la torre y posición de la válvula de purga continua (abierta o cerrada). Se hicieron mediciones de flujo usando un medidor de flujo magnético “GE Panametrics TransPort PT878” y se tomaron los datos de voltaje de los seis ventiladores. En la tabla 1 se muestra un promedio de la temperatura del agua a la entrada y salida de cada celda. Los datos tomados en campo se encuentran en el ANEXO B.

**Tabla 1.** Temperatura del agua en la entrada y salida de la torre.

PROMEDIO DE TEMPERATURAS DEL AGUA						
CELDA	A	B	C	D	E	F
T. ENTRADA [°F]	101,62	101,62	101,45	100,55	100,2	100,9
T. SALIDA [°F]	87,33	87,97	87,57	89,50	92,4	89,40

#### 3.2 Recopilación de datos de diseño

La tabla 2 muestra la recopilación de los datos de diseño para la TE-4401.

**Tabla 2.** Condiciones de operación.

Condiciones de operación	Sistema inglés	S.I.
Flujo de agua	38000 [gpm]	2,39 [m3/s]
Temperatura de agua caliente	120 [°F]	322,04 [K]
Temperatura de agua fría	90 [°F]	305,37 [K]
Temperatura de bulbo seco (aire)	89,03 [°F]	304,83 [K]
Temperatura de bulbo húmedo (ambiente)	82 [°F]	300,93 [K]
Humedad relativa del aire	80 [%]	80 [%]
Pérdida por arrastre (eliminador de rocío)	<0,05 [%]	<0,05 [%]
Pérdida por evaporación	2,8 [%]	2,8 [%]
Altura sobre el nivel del mar	259,91 [ft]	79,22 [m]
Velocidad del viento (diseño)	91,13 [ft/s]	27,77 [m/s]
L/G	1,229	
KaV/L	2,401	

Fuente: [8] [9]

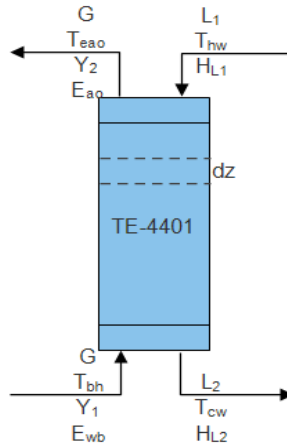
### 3.3 Determinación del L/G

Para encontrar el valor de esta relación es necesario realizar los balances de materia y energía en la torre enfriadora TE-4401.

#### Balance de materia y de energía

La figura 3 muestra una representación de la torre enfriadora TE-4401.

**Figura 4.** Torre enfriadora TE-4401.



#### Balance global de masa

$$L_2 - L_1 = G'(Y_2 - Y_1) \quad (2)$$

#### Balance global de entalpía

$$L_2 H_{L2} + G' E_{wb} + Q = L_1 H_{L1} + G' E_{ao} \quad (3)$$

Asumiendo flujo adiabático, es decir, el calor del agua es cedido en su totalidad al aire, y tomando un elemento diferencial de la torre [10]:

$$d(LH_L) = G' dE \quad (4)$$

En donde:

$$d(LH_L) = LCp_L dT_L \quad (5)$$

$$L = \frac{L_1 + L_2}{2} \quad (6)$$

Reemplazando (5) en (4) se tiene que:

$$LCp_L dT_L = G' dE \quad (7)$$

Integrando:

$$LCp_L \int_{T_{cw}}^{T_{hw}} dT_L = G' \int_{E_{ao}}^{E_{wb}} dE \quad (8)$$

$$LCp_L(T_{hw} - T_{cw}) = G(E_{ao} - E_{wb}) \quad (9)$$

Por cada 10 grados [°F] de enfriamiento la evaporación de agua debe ser máximo 1%, por tal razón la variación del  $Cp_L$  se considera despreciable. [5] [11]

$$\frac{L}{G} = \frac{(E_{ao} - E_{wb})}{(T_{hw} - T_{cw})} \quad (10)$$

Debido a la estructura física de los conos ubicados en la parte superior de cada ventilador, no es posible hacer uso del anemómetro que permite medir el flujo de aire en cada celda, por esta razón se decide trabajar con el dato de diseño, sin embargo, se comprobó por medio de protocolos preventivos realizados por el personal de Ecopetrol que el ángulo de inclinación de las aspas de cada ventilador se encuentra dentro del rango recomendado en el diseño de la torre para manejar un flujo de aire adecuado (12,5° - 14,5°) y que los motores no están sobrecargados según el análisis de amperaje. Ver ANEXO C.

En la tabla 3 se presentan los valores necesarios para encontrar el valor de la relación L/G, de acuerdo a cada valor de temperatura tomado se interpola para encontrar la entalpía correspondiente considerando que la torre se encuentra aproximadamente al nivel del mar. Para obtener el L/G de la torre se calculó el promedio de las diferentes temperaturas y entalpías de las celdas aplicando la ecuación 10.

**Tabla 3. Cálculo del L/G.**

Celda	Teao [°F]	Eao [Btu/lb]	Tbh [°F]	Ewb [Btu/lb]	Tcw [°F]	Thw [°F]	L/G
A	92,1	58,92	78,93	42,52	87,33	101,62	1,15
B	94,2	62,07	77,33	40,87	87,96	101,62	1,553
C	93,1	60,4	77,23	40,77	87,56	101,45	1,41
D	90	55,93	75,17	38,7	89,5	100,55	1,559
E	-	-	-	-	92,4	100,2	-
F	90	55,93	78,73	42,3	89,4	100,94	1,18
TORRE	91,88	58,55	77,48	41,032	89,03	101,06	1,46

Se puede observar que las celdas que presentan el menor valor de L/G son la A y la F, esto ocurre por el cambio de la temperatura del aire, ya que para estas celdas este valor presenta la menor variación, lo cual indica dificultades en el proceso de transferencia de masa. En la torre el L/G es superior al valor de diseño debido a que la temperatura de entrada del agua es tan baja que no es posible disminuirla significativamente, es decir, el rango de la torre es bajo.

### 3.4 APLICACIÓN DE LA TEORÍA DE MERKEL Y MÉTODO DE TCHEBYCHEFF

**3.4.1 Aplicación de la teoría de Merkel** La expresión característica de la torre de enfriamiento se muestra en la ecuación 11; conociendo los valores de temperatura de bulbo húmedo y relación de L/G es posible encontrar el valor de  $KaV/L$ . [12]

$$\frac{KaV}{L} + C \left( \frac{1}{G} \right)^n \quad (11)$$

La ecuación de Merkel (Ecuación 1) también se conoce como número de unidades de transferencia (NTU), para solucionar el lado izquierdo de la ecuación existen

diferentes métodos numéricos, debido a su simplicidad y buena aproximación se utilizó el método numérico de Tchebycheff. [7]Ver ANEXO D.

### 3.4.2 Aplicación del método de Tchebycheff

Al aplicar el método numérico de Tchebycheff [13] [5] para solucionar la ecuación 1, se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{KaV}{L} = \frac{T_{hw} - T_{cw}}{4} * \left( \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} + \frac{1}{E_3} + \frac{1}{E_4} \right) \quad (12)$$

Donde:

$E_1$ : valor de  $(E_{ao} - E_{wb})$  en  $T_{cw} + 0,1(T_{hw} - T_{cw})$

$E_2$ : valor de  $(E_{ao} - E_{wb})$  en  $T_{cw} + 0,4(T_{hw} - T_{cw})$

$E_3$ : valor de  $(E_{ao} - E_{wb})$  en  $T_{cw} - 0,4(T_{hw} - T_{cw})$

$E_4$ : valor de  $(E_{ao} - E_{wb})$  en  $T_{cw} - 0,1(T_{hw} - T_{cw})$

La tabla 4 muestra los primeros cálculos necesarios para obtener los puntos  $A_1$ ,  $B_1$ ,  $C_1$  y  $D_1$  que corresponden a la temperatura del agua.

**Tabla 4.** Cálculo de la temperatura por el método de Tchebycheff.

Celda	Tcw+0,1( $\Delta T$ )	Tcw+0,4( $\Delta T$ )	Thw-0,4( $\Delta T$ )	Thw-0,1( $\Delta T$ )
	$A_1$	$B_1$	$C_1$	$D_1$
A	88,76	93,05	95,91	100,19
B	89,33	93,43	96,16	100,25
C	88,96	93,12	95,90	100,06
D	90,61	93,92	96,13	99,45
E	-	-	-	-
F	90,55	94,02	96,32	99,79
TORRE	90,23	93,84	96,25	99,86

En la tabla 5 se encuentran los valores de la entalpía del agua correspondiente a los valores de temperatura hallados anteriormente.

**Tabla 5.** Valores de hw.

Celda	hw	hw	hw	hw
	(A <sub>1</sub> )	(B <sub>1</sub> )	(C <sub>1</sub> )	(D <sub>1</sub> )
A	54,2	60,27	64,77	72,05
B	54,99	60,9	65,12	72,16
C	54,5	60,42	64,76	71,75
D	56,79	61,62	65,12	70,75
E	-	-	-	-
F	56,66	61,78	65,44	71,36
TORRE	56,25	61,5	65,4	71,45

Para simplificar expresiones, en la tabla 6 se define la variable  $h_2$ ,

**Tabla 6.** Cálculo de  $h_2$ .

Celda	Ewb	Thw	Tcw	L/G	$h_2 = Ewb + (Thw - Tcw) * L/G$
A	42,52	101,62	87,33	1,15	58,92
B	40,87	101,62	87,96	1,553	62,07
C	40,77	101,45	87,56	1,41	60,4
D	38,7	100,55	89,5	1,559	55,93
E	-	-	92,4	-	-
F	42,3	100,94	89,4	1,18	55,93
Promedio	41,032	101,06	89,03	1,46	58,55

Una vez hallada la nueva variable  $h_2$  es posible encontrar los valores de la entalpia del agua, estos se presentan en la tabla 7.

**Tabla 7.** Valores de  $h_a$ .

Celda	$Ewb + 0,1 * (\Delta T) * L / G$	$Ewb + 0,4 * (\Delta T) * L / G$	$h_2 - 0,4 * (\Delta T) * L / G$	$h_2 - 0,1 * (\Delta T) * L / G$
	$h_a (A_1)$	$h_a (B_1)$	$h_a (C_1)$	$h_a (D_1)$
A	44,16	49,08	52,36	57,28
B	42,99	49,35	53,59	59,95
C	42,733	48,62	52,54	58,43
D	40,423	45,59	49,03	54,20
E	-	-	-	-
F	43,663	47,75	50,47	54,56
Promedio	42,78	48,04	51,54	56,79

La tabla 8 muestra la fuerza impulsora de cada celda y de la torre. Las celdas D y F presentan mayor fuerza impulsora, esto indica que, aunque hay enfriamiento, estas celdas tienen más capacidad disponible para retirar calor. En la tabla 13 se muestra el porcentaje de calor removido por cada celda, las celdas D y F son las que menor retiro hacen, sin embargo, estas dos celdas reciben la afectación de la

neblina de aire saturado que emana de la celda vecina E y presentan deterioros significativos en su estructura física; es decir, en un escenario donde las condiciones físicas de estas celdas estén en mejor estado se podrá obtener una mayor eficiencia.

**Tabla 8.** Fuerza impulsora.

CELDA	RELACION DE ENTALPIAS				FUERZA IMPULSORA (hw-ha)
	(hw-ha)	(hw-ha)	(hw-ha)	(hw-ha)	
	A <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>	C <sub>1</sub>	D <sub>1</sub>	ΔPromedio
A	10,04	11,19	12,41	14,77	12,10
B	12,00	11,55	11,53	12,21	11,82
C	11,77	11,80	12,21	13,31	12,27
D	16,37	16,03	16,08	16,54	16,26
E	-	-	-	-	-
F	13,00	14,03	14,96	16,79	14,70
Promedio	13,47	13,46	13,81	14,65	13,85

Finalmente, en la tabla 9 se presenta el valor de KaV/L de cada celda calculado mediante la ecuación 13. El valor de la torre se obtiene por el promedio de las diferentes temperaturas y entalpías de las celdas aplicando la misma ecuación.

$$\frac{KaV}{L} = \left( \frac{\frac{1}{A_1} + \frac{1}{B_1} + \frac{1}{C_1} + \frac{1}{D_1}}{4} \right) * (T_{hw} - T_{cw}) \quad (13)$$

**Tabla 9.** Valores de KaV/L.

Celda	Thw-Tcw	A <sub>1</sub> +B <sub>1</sub> +C <sub>1</sub> +D <sub>1</sub>	KaV/L
A	14,29	0,337	1,205
B	13,65	0,339	1,156
C	13,88	0,327	1,13
D	11,05	0,246	0,68
E	7,8	-	-
F	11,54	0,275	0,79
TORRE	11,08	0,289	0,87

El número de Merkel (KaV/L) es un parámetro que permite evaluar el desempeño de la torre enfriadora, el valor obtenido para la torre (0,87) es menor que el de diseño (2,401) lo cual indica que es eficiente en el retiro de calor, es claro que

celda D es la que presenta menores restricciones para realizar el proceso de enfriamiento.

### 3.5 CÁLCULO DE LAS CURVAS CARACTERÍSTICAS

Los valores de  $KaV/L$  se hallaron mediante el método de Tchebycheff variando el  $L/G$  en un rango de 0,5 a 2, los datos y cálculos realizados se encuentran en el ANEXO E. Las curvas se construyeron en escala logarítmica a partir de la siguiente ecuación: [14] [15]

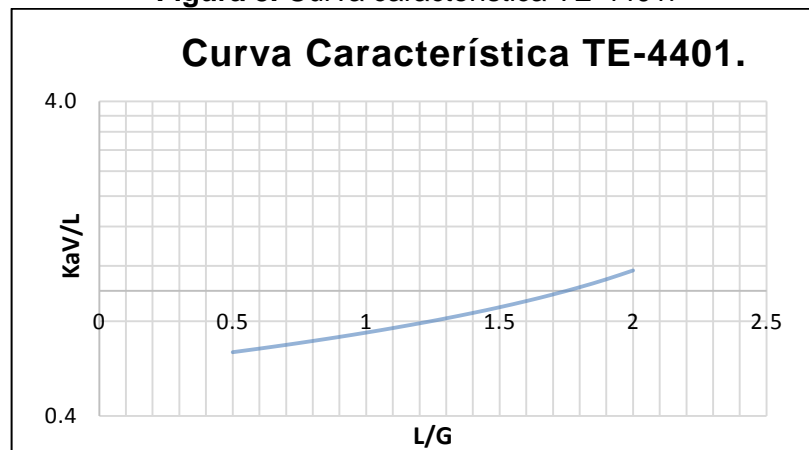
$$\frac{KaV}{L} = C \left(\frac{L}{G}\right)^n \quad (14)$$

$$\text{Log} \left(\frac{KaV}{L}\right) = \text{Log} C - 0,6 \text{Log} \left(\frac{L}{G}\right) \quad (15)$$

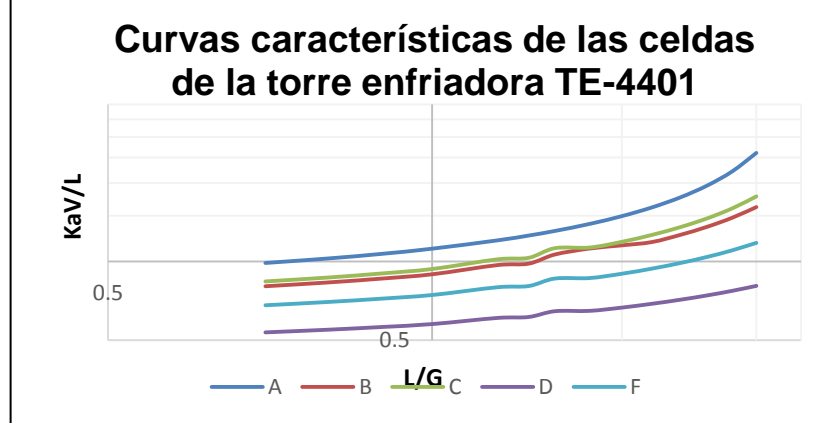
C y n son constantes que dependen del relleno de la torre, sin embargo, en ausencia de estos valores específicos, la literatura [5] [16] recomienda utilizar  $n = -0,6$  y calcular C a partir de dicho valor siguiendo la ecuación (14).

En las figuras 4 y 5 se muestra la curva característica de la torre TE-4401 y la recopilación de todas las celdas, respectivamente. De acuerdo a Merkel, un valor bajo de  $KaV/L$  con respecto al diseño indica una mejor eficiencia, por lo tanto, la celda que presenta la menor dificultad para enfriar el agua es la celda D y la que tiene mayor dificultad para lograr el enfriamiento es la celda A.

**Figura 5.** Curva característica TE-4401.



**Figura 6.** Curvas características de las celdas de la torre TE-4401.



### 3.6 CÁLCULO DE LA EFICIENCIA

#### 3.6.1 Eficiencia de las curvas características

Para calcular la eficiencia de las curvas características es necesario determinar las curvas de operación y diseño. Los valores de KaV/L de diseño, operación y característico hallados se encuentran en el ANEXO F.

##### 3.6.1.1 Constante de las curvas de operación

Una vez obtenidos los valores de L/G y KaV/L se calcula la constante de operación C para la torre y cada una de las celdas. En la tabla 10 se presentan los valores de la constante, entre mayor sea el valor de C la curva será más pronunciada.

**Tabla 10.** Cálculo de la constante de las curvas de operación.

Celda	L/G	KaV/L de operación	C
A	1,15	1,205	1,3
B	1,553	1,156	1,5
C	1,41	1,13	1,4
D	1,559	0,68	0,9
E	-	-	-
F	1,18	0,79	0,9
TORRE	1,46	0,87	1,090

**3.6.1.2 Constante de las curvas de diseño** El valor de la constante de las curvas de diseño se calculó a partir del  $L/G$  y  $KaV/L$  de diseño, por lo tanto, es el mismo valor para la torre y cada una de las celdas. La obtención de las curvas de diseño, sirve como referencia para evaluar el desempeño de la torre enfriadora.

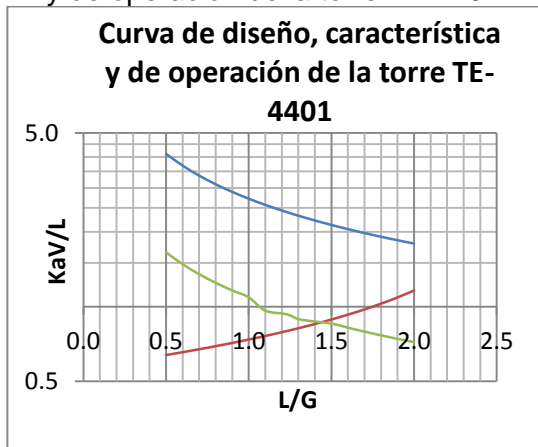
El valor de la constante de las curvas de diseño es de 2,717 calculado a partir de la ecuación 14. Una vez determinado el valor de la constante  $C$  se obtiene el  $KaV/L$  despejando de la ecuación 14, variando  $L/G$  en un rango de 0,5 a 2 hasta lograr la intersección entre la curva de operación y característica.

**3.6.1.3 Curvas de operación, diseño y características** Las figuras 6, 7, 8, 9, 10 y 11 muestran la curva de diseño, característica y de operación de la torre enfriadora y cada una de sus celdas, en estas figuras es posible apreciar el punto de intersección entre la curva de operación y característica ( $L/G$  de intersección) que permite calcular la eficiencia en la curva característica.

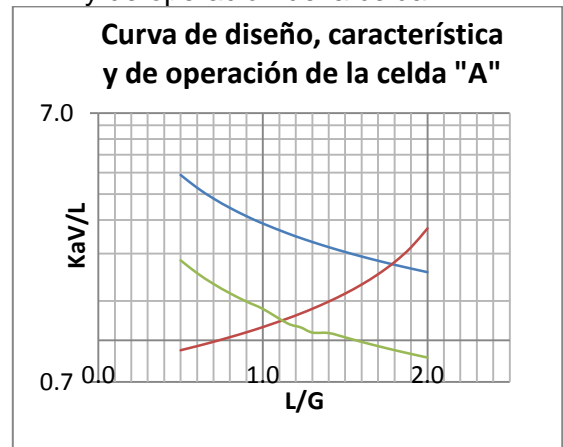
Las Figuras 6, 7, 8, 9, 10 y 11 tienen el siguiente patrón de color:

----- $KaV/L$  diseño      ----- $KaV/L$  característico      ----- $KaV/L$  operación

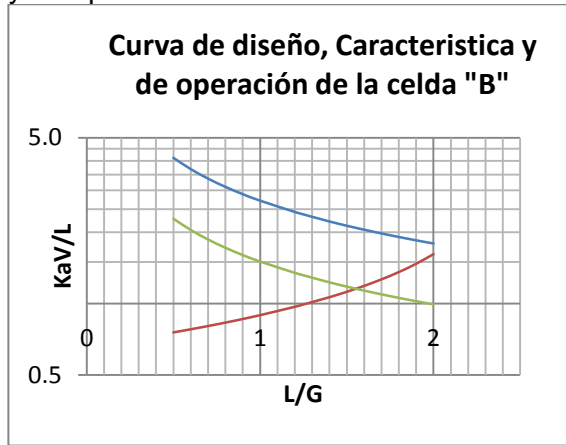
**Figura 7.** Curva de diseño, característica y de operación de la torre TE-4401.



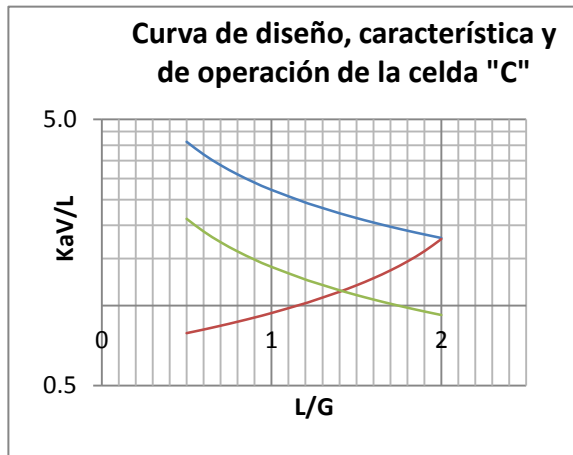
**Figura 8.** Curva de diseño, característica y de operación de la celda "A".



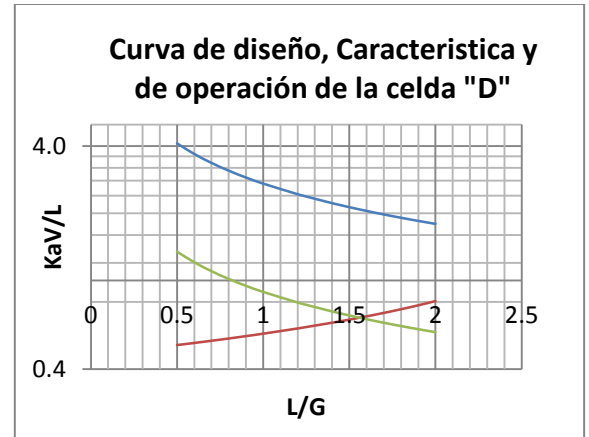
**Figura 9.** Curva de diseño, característica y de operación de la celda "B"



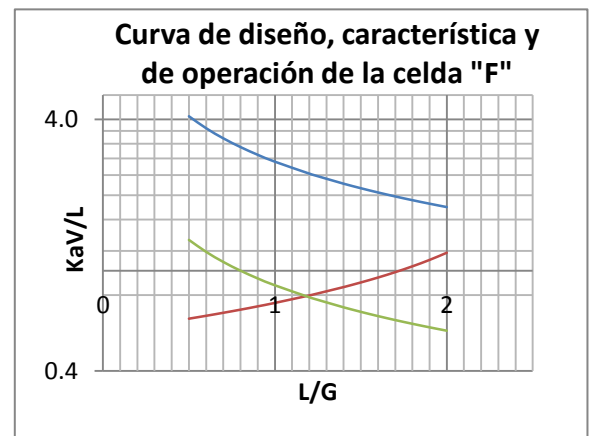
**Figura 10.** Curva de diseño, característica y de operación de la celda "C".



**Figura 11.** Curva de diseño, característica y de operación de la celda "D"



**Figura 12.** Curva de diseño, característica y de operación de la celda "F".



Los valores encontrados de L/G de intersección hacen referencia a los valores óptimos de operación de la torre enfriadora y cada celda, estos se muestran en la tabla 12 junto con la eficiencia de la curva característica. Esta eficiencia se calculó a partir de la siguiente expresión:

$$\% \text{ Eficiencia} = \frac{(L/G)_{\text{Intersección}}}{(L/G)_{\text{Diseño}}} * 100 \quad (16)$$

**Tabla 11.** Eficiencia de las curvas características.

Celda	(L/G) <sub>Diseño</sub>	(L/G) <sub>Intersección</sub>	Eficiencia [%]
A	1,229	1,1	89,50
B	1,229	1,5	122,21
C	1,229	1,4	113,91
D	1,229	1,5	122,05
E	-	-	-
F	1,229	1,18	96,01
TORRE	1,229	1,42	115,54

La eficiencia calculada presenta valores superiores al 100%, a excepción de las celdas A y F, esto se debe a que el L/G de intersección entre la curva característica y la curva de operación es pequeño, la razón de que esto ocurra es la inclinación que presentan las curvas características A y F, pues la pendiente es función de la entalpía de bulbo húmedo del aire y esta se puede ver afectada por corrientes de aire producto de la ubicación lateral de ambas celdas. Cabe aclarar que esta eficiencia es una relación entre flujos, sin embargo, en el argot técnico se conoce como “eficiencia”.

### 3.6.2 Eficiencia de retiro de calor

**3.6.2.1 Cálculo del calor removido de la torre enfriadora** El cálculo de calor removido por la torre enfriadora TE-4401 y sus celdas se determina mediante la ecuación 18, los resultados se muestran en la tabla 12.

$$Q = L * C_p * \Delta(T_h - T_{cw}) \quad (17)$$

**Tabla 12.** Eficiencia con respecto al calor de diseño.

Celda	Flujo (gpm)	Thw-Tcw	Q. Actual [MBTU/h]	Q. Diseño [MBTU/h]	Eficiencia [%]
A	6103	14,29	43,60	114	38,24
B	6740	13,65	46,01	114	40,36
C	5910	13,88	41,03	114	35,99
D	6186	11,05	34,18	114	29,98
E	4180	7,80	16,30	114	14,30
F	5169	11,54	29,83	114	26,16
TORRE	34288	12,04	206,34	684	30,17

En la eficiencia con respecto al calor de diseño las celdas D y F se ven afectadas por la cortina de neblina que genera la celda E, obteniendo así los valores más bajos de esta eficiencia. Las demás celdas tampoco presentan eficiencias buenas, la razón principal es la baja temperatura del agua a la entrada de la torre con respecto a lo estipulado por diseño.

La eficiencia de retiro de calor se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$\%Eficiencia\ de\ retiro\ de\ calor = \frac{Calor\ retirado}{Calor\ generado} * 100 \quad (18)$$

En la tabla 15 se muestra el calor retirado por la torre TE-4401 y el calor generado por las tres unidades del departamento de Cracking II

**Tabla 13.** Eficiencia de retiro de calor.

Retiro de calor en la torre (MBTU/H)	206,34
Calor generado en unidades (MBTU/H)	205,36
<b>Eficiencia de retiro de calor</b>	<b>100,47%</b>

Los resultados obtenidos indican que la torre enfriadora TE-4401 se encuentra retirando el 100,47% del calor generado por el departamento de Cracking II, esto se debe a que el dato de calor generado por las unidades de Cracking II se obtuvo en una fecha diferente a los días de toma de datos de campo y este día en particular hubo baja carga de hidrocarburos en la refinería.

**3.6.3 Eficiencia con respecto al L/G** La capacidad de enfriamiento de la torre TE-4401 puede evaluarse a partir del cociente entre el L/G operación y el L/G de diseño, se calcula en la tabla 14. Esta eficiencia es una relación entre flujos, sin embargo, en el argot técnico se conoce como “eficiencia”.

$$\%Eficiencia = \frac{(L/G)_{operación}}{(L/G)_{diseño}} * 100 \quad (19)$$

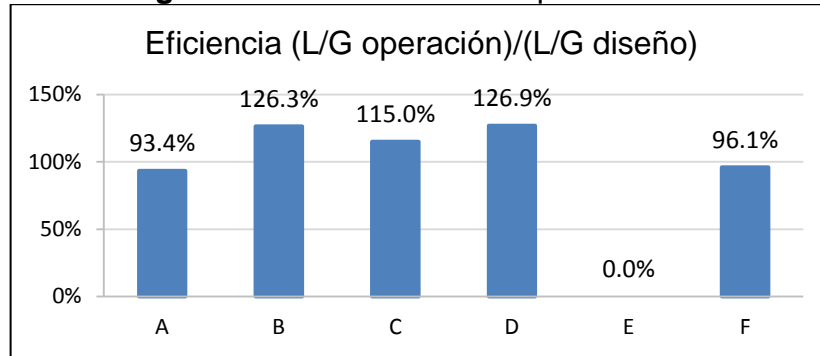
**Tabla 14.** Eficiencia con respecto al L/G.

<b>Celda</b>	<b>(L/G operación)</b>	<b>(L/G diseño)</b>	<b>Eficiencia de la torre</b>
A	1,15	1,229	93,4%
B	1,553	1,229	126,3%
C	1,41	1,229	115,0%
D	1,559	1,229	126,9%
E	-	-	-
F	1,18	1,229	96,1%
<b>TORRE</b>	1,46	1,229	118,8%

## 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

### 4.1 Eficiencia de acuerdo al L/G de diseño y el L/G de operación.

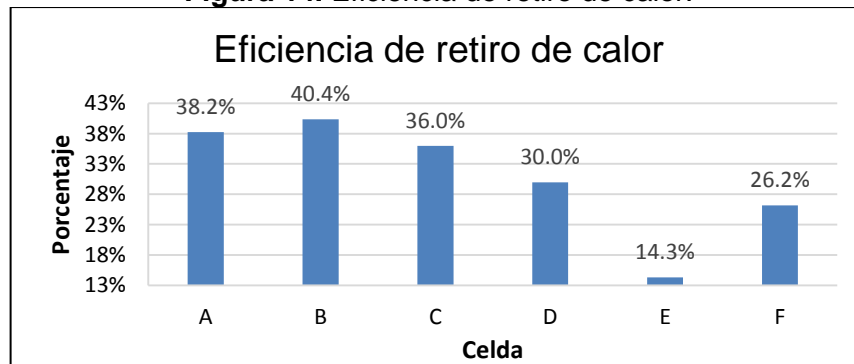
**Figura 13.** Eficiencia con respecto al L/G.



En la figura 12 se muestra la eficiencia de cada celda según la relación entre el L/G de operación y L/G de diseño. Este criterio es útil para verificar que la torre se encuentre operando adecuadamente y cercana a los valores que, por diseño, están establecidos. Merkel menciona que cuando existen eficiencias superiores al 100% se debe buscar causas adicionales que las generan como: bajos rangos de operación, alta aproximación, daños en internos, fallas en la medición, altos consumos energéticos, etc. [2][5] Además, el agua, por diseño, debe ingresar a la torre a una temperatura igual a 120 °F, sin embargo, actualmente ingresa a 101,1 °F, generando que el rango sea bajo y, este, al ser denominador de la ecuación del L/G (ecuación 10) arroja resultados mayores.

### 4.2 Eficiencia de la torre enfriadora TE-4401 de acuerdo al retiro de calor.

**Figura 14.** Eficiencia de retiro de calor.



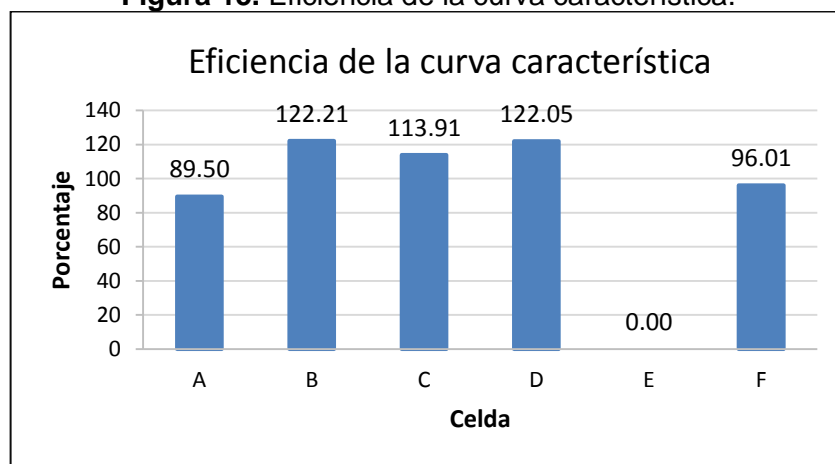
La figura 13 muestra la eficiencia del retiro de calor en función de la capacidad de diseño de cada celda, es decir, las celdas están trabajando entre 26,16% y 40,36% de su capacidad; exceptuando la celda E que presenta una eficiencia baja de 14,30% debido a que su ventilador estaba fuera de servicio y la válvula de retorno se encontraba abierta dando lugar a una transferencia mínima entre el agua y el ambiente.

Aunque las seis celdas estén utilizando menos de la mitad de su capacidad, se evidencia que las celdas A, B y C son las que mejor eficiencia tienen desde el punto de vista de retiro de calor; la operación de la celda E sin ventilador está afectando el retiro de calor en las celdas D y F debido a que parte de la masa de aire que ingresa a estas celdas es proveniente del aire húmedo saturado que emana de la celda E y migra por acción de las corrientes de aire. Esta masa de aire migrante ya se encuentra saturada, por tal razón dificulta la transferencia de masa y calor en las celdas D y F.

Las eficiencias térmicas de la torre son bajas debido a que la capacidad instalada para retiro de calor en cada celda es alta (114MBTU/h) respecto a lo que se genera actualmente (máximo 46,01MBTU/h).

#### 4.3 Eficiencia de la torre enfriadora TE-4401 de acuerdo la curva característica.

Figura 15. Eficiencia de la curva característica.



Los resultados de eficiencia obtenidos por curva característica se presentan en la figura 14 y muestran una gran similitud respecto a los obtenidos por medio del L/G, las celdas de mayor eficiencia son la B, C y D. La celda D, desde el punto de vista de curva característica es eficiente, sin embargo, el rango es el más bajo y la aproximación es la más alta de todas, es decir, la diferencia entre la temperatura de bulbo húmedo y la temperatura de salida del agua es alta, indicando que la celda no es eficiente en el retiro de calor, pero presenta buena capacidad para retirar calor pues la fuerza impulsora es la mayor de todas.

La eficiencia de la curva característica se calcula con el fin de determinar el valor óptimo del L/G, una vez calculada la relación que ofrece mayor eficiencia, se recomienda buscar operar las torres bajo las condiciones que propician este punto óptimo y así mejorar beneficios costo-operación.

NOTA: Todos los cálculos se realizaron en sistema inglés debido a que los equipos de medición arrojan los datos en este sistema. Al trabajar con estos datos se disminuyó el porcentaje de error generado por el cambio de unidades.

## 5. RECOMENDACIONES

Mediante la inspección visual fue posible determinar que la torre presenta daños físicos en su estructura, por razones de seguridad industrial no fue posible ingresar a ninguna celda para corroborar el estado actual de las rejillas, a continuación, se describen los hallazgos de campo y las recomendaciones que garantizan mejora en el funcionamiento de la torre:

El cable del vibraswitch de la celda A se encuentra suelto de la estructura del cono, este debe asegurarse para evitar que caiga al atrapanebolina y pueda ocasionar el apagado del ventilador.

Las celdas B, C y E requieren mantenimiento mecánico y químico para la remoción del material microbiológico y vegetación en la zona del atrapanebolina.

La celda C evidencia una distribución de agua no uniforme, hay espacios libres en medio de la cortina de agua por posible taponamiento en las rejillas. Se recomienda realizar mantenimiento para habilitar el curso normal del agua y garantizar la pulverización de las gotas aumentando el área de transferencia.

La zona del atrapanebolina de la celda D se encuentra deteriorada y con áreas faltantes, se evidencia alta presencia de sólidos secos (lodo) distribuidos en el espacio, es necesario recuperar el atrapanebolina perdido porque esto garantiza el porcentaje mínimo de pérdidas de agua por arrastre, evitando así sobre costos en el proceso.

Se observa corrosión localizada con escape de agua por encima del tubo distribuidor de la celda E (sobre el atrapanebolina), se evidencia humedad en el perímetro exterior de la base del cono, hay presencia de material biológico y residuos metálicos en la zona del atrapanebolina y se distingue lodo colgante en las rejillas debajo de la zona empacada, en la cortina de agua se observa que es la celda con menor flujo de agua, debido a que el ventilador se encontraba fuera de servicio se evidencia que los ventiladores de las celdas D y F succionan gran parte

de este aire saturado. Estas fallas deben corregirse para garantizar la correcta operación de la celda y de las celdas vecinas.

La celda F presenta residuos sólidos (lodos y metálicos) en la zona del atrapanebolina, la cortina de agua está sectorizada y se observan 3 chorros de agua densos en medio de la cortina. Esto se debe a que los ramales de distribución de agua y/o las boquillas se encuentran deteriorados, afectando el rendimiento de la celda ya que se reduce el área de transferencia entre la fase gaseosa y la fase líquida. Se recomienda inspeccionar y reparar este hallazgo.

La estructura del cono de los ventiladores no permite la toma de mediciones como el flujo de aire, esta variable es de gran importancia para obtener resultados más acertados ya que permitiría trabajar cálculos con flujos reales y no los de diseño, es por esto que se propone proporcionar un orificio lo suficientemente grande que permita el paso del anemómetro.

Las tuberías de retorno de agua a cada celda no cuentan con un medidor local de temperatura, al igual que la descarga de las bombas MP-4405A/B y NP-4405C, poder disponer de estos medidores facilita y precisa la toma de temperatura en estas corrientes, reduciendo el porcentaje de error humano.

Las válvulas de la tubería de agua de retorno y purgas de lodos requieren pronto mantenimiento debido a que, por razones de deterioro en su material, optaron una posición fija y no es posible controlar el flujo de estas tuberías manualmente. Es importante recuperar estas válvulas para evitar posibles complicaciones en la operación manual de la torre.

Debido a la presencia de lodo y vegetación en las celdas que operan, se recomienda realizar choque con biocida y limpieza mecánica de las paredes de cada celda durante la próxima intervención de la torre.

## 6. CONCLUSIONES

El desempeño de la torre enfriadora TE-4401 se ve afectado principalmente por la relación  $KaV/L$ , el rango, la relación  $L/G$  y las condiciones físicas de la torre. Para garantizar que la torre trabaje en estado óptimo, se debe procurar manejar una relación  $L/G$  cercana al punto de intersección de la curva característica y de operación.

La eficiencia de la celda A con respecto a la relación  $L/G$  y a la curva característica es buena, sin embargo, presenta mejor eficiencia según el retiro de calor ya que es la celda que logra disminuir más la temperatura del agua, es decir, es la celda con el mayor rango.

La celda B es la que mayor flujo de agua maneja y mayor retiro de calor hace (46,01 MBTU/h), afirmando que el flujo de aire de operación es el adecuado y esto se corrobora al ser esta, la celda que mayor eficiencia de retiro de calor tiene.

La celda C, aunque no presenta la mayor eficiencia, siempre estuvo dentro de las mejores celdas, esto se debe a que su capacidad de enfriamiento es buena pero presenta afectaciones físicas en el relleno de la celda, lo que no la permite llegar al punto de mayor eficiencia.

La celda D presenta el valor de la relación  $KaV/L$  más bajo, es decir, tiene el menor grado de dificultad para retirar el calor, sin embargo, la eficiencia de retiro de calor no es la mejor porque la temperatura del agua a la entrada de la celda es baja (100,5 °F), además de presentar obstrucción y daños en la zona del atrapanebolina.

La celda E está afectando el comportamiento de las celdas vecinas (D y F) debido a que la válvula de retorno se encuentra abierta y el ventilador apagado, haciendo que la neblina de aire saturado entre a las otras celdas y disminuya su eficiencia.

Una celda que opera con el ventilador fuera de servicio logra un enfriamiento mínimo del agua y afecta significativamente las condiciones de las celdas vecinas, disminuyendo considerablemente la eficiencia global.

La celda F es la que menor retiro de calor tiene, físicamente se observa que la cortina de agua está sectorizada con chorros directos de agua a presión, esto se traduce en daños internos que afectan la distribución de agua y, por ende, el área de contacto entre el agua y el aire.

La torre enfriadora TE-4401 presenta una baja remoción de calor debido a que la energía generada por las unidades de Cracking II, bajo las condiciones actuales, son 205,36 MBTU/h y la torre puede retirar hasta 684 MBTU/h. Esta situación se debe a la baja carga que está recibiendo la refinería actualmente por la baja disposición de hidrocarburos en el país.

La torre enfriadora TE-4401 cumple con el retiro del 99,5% de la energía que recibe, lo cual indica que el equipo está operando bien, sin embargo, la eficiencia de cada celda y de la torre en general se puede optimizar si se corrigen los daños internos por medio de mantenimiento.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] SPX Cooling Technologies, Cooling tower fundamentals, Overland Park, 2009.
- [2] AMERICAN Society Of Heating, Refrigerating And Air-Conditioning Engineers, Inc., 2012 ASHRAE Handbook - Heating, Ventilating, and Air-Conditioning Systems and Equipment (I-P Edition), Atlanta: ASHRAE, 2012.
- [3] BROOKE M., Cooling Water Treatment-A Review, Hydrocarbon Process., Petrol Refinery., 1957.
- [4] COSTA J., S. Cervera March, F. Cunill García, S. Esplugas Vidal, C. Mals Teixido And J. Mota Alvarez, Curso de ingeniería química, Barcelona: Reverté S.A., 2004.
- [5] COOLING Tower Institute, CTI Code Tower Standard Specifications, United States, 1971.
- [6] COKER, Ludwig's Applied Process Design for Chemical and Petrochemical Plants, Volume 1., Burlington: Elsevier, 2007.
- [7] PETCHERS, Combined Heating, Cooling & Power Handbook - Technologies & Applications (2nd Edition), Fairmont Press, Inc., 2012.
- [8] EDOSPINA S.A., Catálogo mecánico 67-2, Bogotá D.C., 1995.
- [9] EDOSPINA S.A., Catálogo mecánico 67-3., Bogotá D.C., 1994.
- [10] TREYBAL, Operaciones de transferencia de masa., México: McGraw-Hill, 1990.
- [11] COUPER J. R., W. R. Penney, J. R. Fair And S. M. Walas, Chemical Process Equipment - Selection and Design (3rd Edition), Waltham: Elsevier, 2012.
- [12] M. MCKELVEY and K. K. Brooke, The Industrial Cooling Tower, Amsterdam: Elsevier, 1959.
- [13] DAEIL Aqua co., Ltd, Cooling Tower Thermal Design Manual, Korea, 2003.

- [14] CARLSON C., Cooling Tower Problems and Solutions, University of Maryland, 1970.
- [15] KRÖGER D. G., Air-Cooled Heat Exchangers and Cooling Towers - Thermal-Flow Performance Evaluation and Design, Volume 1., Tulsa: PennWell, 2004.
- [16] GRUPO de gestión eficiente de energía, KAI; Grupo de investigación en energías, GIEN, Evaluación energética de torres de enfriamiento., 2011.

## BIBLIOGRAFÍA

- AMERICAN Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. (2012). *2012 ASHRAE Handbook - Heating, Ventilating, and Air-Conditioning Systems and Equipment (I-P Edition)*. Atlanta: ASHRAE.
- AMERICAN Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. (2013). *District Cooling Guide*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
- BROOKE, M. (1957). *Cooling Water Treatment-A Review, Hydrocarbon Process*. Petrol Refinery.
- CARLSON, C. (1970). *Cooling Tower Problems and Solutions*. University of Maryland.
- COKER, A. K. (2007). *Ludwig's Applied Process Design for Chemical and Petrochemical Plants, Volume 1*. Burlington: Elsevier.
- COOLING Tower Institute. (1971). *CTI Code Tower Standard Specifications*. United States.
- COSTA, J., Cervera March, S., Cunill García, F., Esplugas Vidal, S., Mals Teixido, C., & Mota Alvarez, J. (2004). *Curso de ingeniería química*. Barcelona: Reverté S.A.
- COUPER, J. R., Penney, W. R., Fair, J. R., & Walas, S. M. (2012). *Chemical Process Equipment - Selection and Design (3rd Edition)*. Waltham: Elsevier.
- DAEIL Aqua Co., Ltd. (2003). *Cooling Tower Thermal Design Manual*. Korea.
- DON W. et, a. (1984). *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. New York: McGraw-Hill.
- EDOSPINA S.A. (1994). *Catálogo mecánico 67-3*. Bogotá D.C.
- EDOSPINA S.A. (1995). *Catálogo mecánico 67-4*. Bogota D.C.
- GRONDZIK, W. T. (2007). *Air-Conditioning System Design Manual*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
- HERNÁNDEZ Goribar, E. (2009). *Fundamentos de aire acondicionado y refrigeración*. México: Limusa.

- KRÖGER, D. G. (2004). *Air-Cooled Heat Exchangers and Cooling Towers - Thermal-Flow Performance Evaluation and Design, Volume 1*. Tulsa: PennWell.
- KRÖGER, D. G. (2004). *Air-Cooled Heat Exchangers and Cooling Towers- Thermal-Flow Performance Evaluation and Design, Volume 2*. Tulsa: PenWell.
- LYONS, W. C., Plisga, G. J., & Lorenz, M. D. (2016). *Standard Handbook of Petroleum and Natural Gas Engineering (3rd Edition)*. Waltham: Elsevier.
- MCKELVEY, M., & Brooke, K. K. (1959). *The Industrial Cooling Tower*. Amsterdam: Elsevier.
- NALCO. (2011). 3DT121; MSDS 3DT121. Naperville, IL: Nalco.
- NALCO. (2013). 55372; MSDS 55372. NAPERVILLE, IL.
- NALCO. (2013). 7344; MSDS 7344. Naperville, IL.
- NALCO. (2013). 8558; MSDS 8558. Naperville, IL.
- NALCO. (2015). 73199; MSDS 73199. Naperville, IL.
- PARKASH, S. (2003). *Refining Processes Handbook*. Burlington: Elsevier.
- PETCHERS, N. (2012). *Combined Heating, Cooling & Power Handbook - Technologies & Applications (2nd Edition)*. Fairmont Press, Inc.
- PRANAB , K., Sanchayan , M., Balaram, K., & Somchai , W. (2015). Investigation of the crosswind-influenced thermal performance of a natural draft counterflow cooling tower. *International Journal of a natural draft counter flow cooling tower.*, 1049-1057.
- ROSALER, R. (1995). *The Standard Handbook of Plant Engineering*. New York: McGraw-Hill.
- SPX Cooling Technologies. (2009). *Cooling tower fundamentals*. Overland Park.
- TREYBAL, R. (1990). *Operaciones de transferencia de masa. .* México: McGraw-Hill.

## ANEXOS

### ANEXO A. QUÍMICA DE NALCO Y DOSIFICACIÓN

3DT121: Regula la concentración de acero, manganeso, fosfato de calcio, zinc y solidos suspendidos (25 ppm diarias continuas, 15L). [17]

7344: Disminuye la cantidad de cloro por la separación mecánica en la torre de enfriamiento, y ayuda a reducir la degradación de la incrustación de base orgánica y de los inhibidores de corrosión (2-3ppm diarias continuas 1-2L). [18]

8558: Mezcla balanceada de inhibidores anódicos catódicos que permiten obtener una protección completa de los sistemas. Opera en un amplio rango de pH con lo cual puede eliminarse el uso de ácido o soda (42 ppm diarias continuas 15-20L). [19]

55372: Mezcla única de penetrante de depósitos, surfactantes y dispersantes poliméricos formulados para complementar y mejorar los programas de tratamiento de control de incrustaciones, depósitos y corrosión (4-5 ppm diarias continuas, 2L diarios). [20]

73199: Producto orgánico inhibidor de cobre, diseñado para complementar otros tratamientos químicos de sistemas de enfriamiento con recirculación de agua que contengan cobre o aleaciones de cobre (2ppm diaria continua, 1-2L). [21]

## ANEXO B. DATOS DE CAMPO

Tabla 15. Datos de campo 8:00 am.

Celda	03/03/2016 ---- 8:00 a.m.				
	Flujo(gpm)	m3/H	vel[ft/s]	°Aspas	Amperaje
A	6103	1386,14	7,02	14,3	163,6
B	6740	1530,82	7,81	12,64	150,2
C	5910	1342,31	6,82	14,3	148
D	6186	1404,99	6,91	13,47	152
E	4180	949,38	4,81	12,64	
F	5169	1174,01	5,97	14,3	154
Promedios	5714,7	1297,94	6,557	13,61	153,56

Tabla 16. Datos de campo 2:00 pm.

Celda	03/03/2016 ---- 2:00 p.m.				
	Flujo(gpm)	m3/H	vel [ft/s]	°Aspas	Amperaje
A	6103	1386,14	7,02	14,3	163,6
B	6740	1530,82	7,81	12,64	150,2
C	5910	1342,31	6,82	14,30	148
D	6186	1404,99	6,91	13,47	152
E	4180	949,38	4,81	12,64	-
F	5169	1174,01	5,97	14,30	154
Sumatoria	34288	7787,65	-	-	-
Promedio	5714,7	1297,94	6,557	13,61	153,56

Tabla 17. Datos de campo 5:00 pm.

Celda	03/03/2016 ---- 5:00 p.m.				
	Flujo (gpm)	m3/H	vel [ft/s]	°Aspas	Amperaje
A	6103	1386,14	7,02	14,3	163,6
B	6740	1530,82	7,81	12,64	150,2
C	5910	1342,31	6,82	14,3	148
D	6186	1404,99	6,91	13,47	152
E	4180	949,38	4,81	12,64	-
F	5169	1174,01	5,97	14,30	154
Sumatoria	34288	7787,65	-	-	-
Promedio	5714,67	1297,94	6,557	13,61	153,56

Tabla 18. Especificaciones de cada celda.

Celda	Promedios por celda				
	Flujo (gpm)	m3/H	vel [ft/s]	°Aspas	Amperaje
A	6103	1386,14	7,02	14,3	163,6
B	6740	1530,82	7,81	12,64	150,2
C	5910	1342,31	6,82	14,3	148
D	6186	1404,99	6,91	13,47	152
E	4180	949,38	4,81	12,64	-
F	5169	1174,01	5,97	14,3	154
Sumatoria	34288	7787,6483	-	-	-
Promedios	9796,6	1297,94	6,56	13,61	153,56

La temperatura de retorno del agua se tomó durante los días 26, 29 de Febrero, 1, 2, 3 de Marzo y finalmente durante los días 4 y 5 de Abril del 2016.

**Tabla 19.** Datos de temperatura de retorno.

<b>Temperatura de retorno [°F] Thw</b>					
<b>Celda</b>	<b>26/02/16</b>	<b>29/02/16</b>			<b>01/03/16</b>
	<b>Medio día</b>	<b>Mañana</b>	<b>Medio día</b>	<b>Tarde</b>	<b>Mañana</b>
A	102,6	96,4	99,5	102,9	100,6
B	104,8	96,3	99	101,6	100,7
C	102,9	96,4	98,9	101,2	101,2
D	100,3	96,2	97,6	100,7	101,2
E	-	-	-	-	-
F	98,4	96,4	96	100,6	102,8

**Tabla 20.** Promedio de temperatura de retorno.

<b>Temperatura de retorno [°F] Thw</b>						
<b>Celda</b>	<b>02/03/16</b>		<b>03/03/16</b>	<b>04/04/16</b>	<b>05/04/16</b>	<b>Promedio (Thw)</b>
	<b>Mañana</b>	<b>Tarde</b>	<b>Mañana</b>	<b>Tarde</b>	<b>Tarde</b>	
A	99,6	106,1	101,5	104	103	101,62
B	99,5	105,8	101,3	103,2	104	101,62
C	100,1	105,9	100,9	103	104	101,45
D	99,6	105,3	100,5	100,1	104	100,55
E					100,2	100,2
F	100,3	103,8	103,3	103,8	104	100,94

La temperatura de salida del agua, de bulbo húmedo, bulbo seco y humedad relativa fueron tomadas el día 3 de Marzo en cada celda

**Tabla 21.** Temperatura de salida del agua.

<b>Celda</b>	<b>Temperatura de salida [°F] (Tcw)</b>			
	<b>Mañana</b>	<b>Medio día</b>	<b>Tarde</b>	<b>Promedio</b>
A	86	86	90	87,33
B	86,5	86	91,4	87,97
C	86,3	86	90,4	87,57
D	89,5	86	93	89,50
E	90	93,2	94	92,4
F	90	84,2	94	89,40

**Tabla 22.** Temperatura de bulbo seco y húmedo del aire a la entrada.

Celda	T. bulbo seco [°F] (Tbs)				T. bulbo húmedo [°F] (Tbh)			
	Mañana	Medio día	Tarde	Promedio	Mañana	Medio día	Tarde	Promedio
A	82,7	96,9	92,1	90,57	75,2	81,3	80,3	78,93
B	82,8	92,2	92,8	89,27	75,4	77	79,6	77,33
C	81,6	93	93,1	89,23	75,6	76,5	79,6	77,23
D	81,4	91,4	92,5	88,43	77,1	66,8	81,6	75,17
E								
F	82,2	92	88	87,40	79,2	80	77	78,73

**Tabla 23.** Humedad relativa.

Celda	Humedad relativa del aire [%]			
	Mañana	Medio día	Tarde	Promedio
A	70,1	53,2	62,5	61,93
B	71,7	51,4	56,6	59,90
C	74,2	48	55,9	59,37
D	80,5	51,3	60	63,93
E	-	-	-	-
F	89	68	66	74,33

Amperaje y voltaje de los ventiladores

**Tabla 24.** Amperaje y voltaje de los ventiladores.

Celda	Amperaje y Voltaje Ventiladores		
	Diseño (Amp)	Real (Amp)	Voltaje
A	172	163,6	480
B	172	150,2	480
C	172	148	480
D	172	152	480
E			
F	172	154	480

Temperatura de succión y descarga de la bomba MP-4405 A/B

**Tabla 25.** Temperatura de succión y descarga de la bomba MP-4405A/B.

Bomba	26/02/16	29/02/16			01/03/16
	Medio día	Mañana	Medio día	Tarde	Mañana
MP 4405 A	86,25	87,2	91,4	93,4	96
MP 4405 B	86,05	86,6	90,8	88,85	89,65

**Tabla 26.** Temperatura promedio de succión y descarga de la bomba MP-4405 A/B.

Bomba	02/03/16		03/03/16	04/04/16	05/04/16	Promedio
	Mañana	Tarde	Mañana	Tarde	Tarde	
MP 4405 A	87,65	93,3	88,5	89,5	88	90,12
MP 4405 B	87,35	91,85	88,1	85	86,5	88,075

## ANEXO C. ÁNGULO DE INCLINACIÓN DE LAS ASPAS

En la tabla 17 se presenta el ángulo de inclinación de las aspas de los ventiladores.

**Tabla 27.** Ángulo de inclinación de las aspas de los ventiladores.

Celda	A	B	C	D	E	F
∠ Aspas	14,3°	12,64°	14,3°	13,47°	12,64°	14,3°

De acuerdo a la energía que consume cada ventilador se puede considerar que están operando de manera óptima desde el punto de vista mecánico (circulación de aire) dentro de la operación esperada.

**Tabla 28.** Intensidad de corriente eléctrica de los ventiladores.

Celda	A	B	C	D	E	F
Amperaje [A]	163,6	150,2	148	152	-	154

En la tabla 18 se muestra la intensidad de corriente eléctrica, el valor de diseño de cada ventilador es 172 amperios, eso demuestra que los ventiladores están trabajando de manera óptima sin sobrecarga.

## ANEXO D. MÉTODO DE TCHEBYCHEFF

El método de Tchebycheff se define como:

$$Ydx = \frac{(b-a)}{4} * (y_1 + y_2 + y_3 + y_4)$$

Donde:

- $y_1$  es evaluado en  $x = a + 0,1(b-a)$
- $y_2$  es evaluado en  $x = a + 0,4(b-a)$
- $y_3$  es evaluado en  $x = a - 0,4(b-a)$
- $y_4$  es evaluado en  $x = a - 0,1(b-a)$

## ANEXO E. CÁLCULO DE LOS VALORES DE KaV/L PARA LAS CURVAS CARACTERÍSTICAS

### Cálculo de la curva característica de la torre TE-4401

Tabla 29. Cálculo de la curva característica TE-4401.

L/G	ha(A)	ha(B)	ha(C)	ha(D)	$\Delta A$	$\Delta B$	$\Delta C$	$\Delta D$	A	B	C	D	$\Delta T$	KaV/L
0,5	41,6	43,44	44,64	46,45	14,62	18,1	20,71	25	0,07	0,05	0,04	0,04	12,04	0,63
0,6	41,8	43,92	45,37	47,53	14,5	17,6	19,99	23,92	0,07	0,05	0,05	0,042	12,04	0,65
0,7	41,9	44,4	46,09	48,61	14,38	17,1	19,26	22,84	0,07	0,05	0,05	0,044	12,04	0,67
0,8	42	44,88	46,81	49,7	14,26	16,6	18,54	21,75	0,07	0,06	0,05	0,046	12,04	0,69
0,9	42,1	45,37	47,53	50,78	14,14	16,1	17,82	20,67	0,07	0,06	0,05	0,048	12,04	0,71
1	42,2	45,85	48,25	51,86	14,01	15,7	17,1	19,59	0,07	0,06	0,05	0,051	12,04	0,73
1,1	42,4	46,33	48,98	52,95	13,89	15,2	16,38	18,5	0,07	0,06	0,06	0,054	12,04	0,76
1,229	42,5	46,95	49,91	54,35	13,74	14,6	15,44	17,11	0,07	0,06	0,06	0,058	12,04	0,79
1,3	42,6	47,29	50,42	55,11	13,65	14,2	14,93	16,34	0,07	0,07	0,06	0,061	12,04	0,81
1,4	42,7	47,77	51,14	56,2	13,53	13,7	14,21	15,25	0,07	0,07	0,07	0,066	12,04	0,85
1,5	42,8	48,25	51,86	57,28	13,41	13,2	13,49	14,17	0,08	0,07	0,07	0,071	12,04	0,88
1,6	43	48,74	52,59	58,36	13,29	12,8	12,76	13,09	0,08	0,07	0,07	0,076	12,04	0,92
1,7	43,1	49,22	53,31	59,45	13,17	12,3	12,04	12	0,08	0,08	0,08	0,083	12,04	0,97
1,8	43,2	49,7	54,03	60,53	13,05	11,8	11,32	10,92	0,08	0,08	0,08	0,092	12,04	1,02
1,9	43,3	50,18	54,75	61,61	12,93	11,3	10,6	9,837	0,08	0,08	0,09	0,102	12,04	1,08
2	43,4	50,66	55,48	62,7	12,81	10,8	9,875	8,754	0,08	0,09	0,10	0,114	12,04	1,16

### Cálculo de la curva característica de la celda "A"

Tabla 30. Cálculo de la curva característica de la Celda "A".

L/G	ha(A)	ha(B)	ha(C)	ha(D)	$\Delta A$	$\Delta B$	$\Delta C$	$\Delta D$	A	B	C	D	$\Delta T$	KaV/L
0,50	43,23	45,38	46,81	48,95	10,97	14,89	17,96	23,10	0,09	0,07	0,06	0,04	14,29	0,92
0,60	43,38	45,95	47,66	50,23	10,82	14,32	17,11	21,82	0,09	0,07	0,06	0,05	14,29	0,95
0,70	43,52	46,52	48,52	51,52	10,68	13,75	16,25	20,53	0,09	0,07	0,06	0,05	14,29	0,99
0,80	43,66	47,09	49,38	52,81	10,54	13,18	15,39	19,24	0,09	0,08	0,06	0,05	14,29	1,03
0,90	43,81	47,66	50,23	54,09	10,39	12,61	14,54	17,96	0,10	0,08	0,07	0,06	14,29	1,07
1,00	43,95	48,23	51,09	55,38	10,25	12,04	13,68	16,67	0,10	0,08	0,07	0,06	14,29	1,12
1,15	44,16	49,09	52,38	57,31	10,04	11,18	12,39	14,74	0,10	0,09	0,08	0,07	14,29	1,21
1,23	44,28	49,54	53,05	58,32	9,92	10,73	11,72	13,73	0,10	0,09	0,09	0,07	14,29	1,26
1,30	44,38	49,95	53,66	59,24	9,82	10,32	11,11	12,81	0,10	0,10	0,09	0,08	14,29	1,31
1,40	44,52	50,52	54,52	60,52	9,68	9,75	10,25	11,53	0,10	0,10	0,10	0,09	14,29	1,39
1,50	44,66	51,09	55,38	61,81	9,54	9,18	9,39	10,24	0,10	0,11	0,11	0,10	14,29	1,49
1,60	44,81	51,66	56,24	63,09	9,39	8,61	8,53	8,96	0,11	0,12	0,12	0,11	14,29	1,61
1,70	44,95	52,23	57,09	64,38	9,25	8,04	7,68	7,67	0,11	0,12	0,13	0,13	14,29	1,76
1,80	45,09	52,81	57,95	65,66	9,11	7,46	6,82	6,39	0,11	0,13	0,15	0,16	14,29	1,95
1,90	45,23	53,38	58,81	66,95	8,97	6,89	5,96	5,10	0,11	0,15	0,17	0,20	14,29	2,22
2,00	45,38	53,95	59,66	68,24	8,82	6,32	5,11	3,81	0,11	0,16	0,20	0,26	14,29	2,61

## Cálculo de la curva característica de la celda "B"

**Tabla 31.** Cálculo de la curva característica de la celda "B".

L/G	ha(A)	ha(B)	ha(C)	ha(D)	$\Delta A$	$\Delta B$	$\Delta C$	$\Delta D$	A	B	C	D	$\Delta T$	KaV/L
0,50	41,55	43,60	44,97	47,01	13,44	17,30	20,15	25,15	0,07	0,058	0,05	0,04	13,65	0,75
0,60	41,69	44,15	45,79	48,24	13,30	16,75	19,33	23,92	0,08	0,060	0,05	0,04	13,65	0,78
0,70	41,83	44,69	46,60	49,47	13,16	16,21	18,52	22,69	0,08	0,062	0,05	0,04	13,65	0,80
0,80	41,96	45,24	47,42	50,70	13,03	15,66	17,70	21,46	0,08	0,064	0,05	0,04	13,65	0,83
0,90	42,10	45,79	48,24	51,93	12,89	15,11	16,88	20,23	0,08	0,066	0,05	0,04	13,65	0,86
1,00	42,24	46,33	49,06	53,16	12,75	14,57	16,06	19,00	0,08	0,069	0,06	0,05	13,65	0,89
1,15	42,51	47,42	50,70	55,62	12,48	13,48	14,42	16,54	0,08	0,074	0,06	0,06	13,65	0,97
1,23	42,55	47,58	50,94	55,97	12,44	13,32	14,18	16,19	0,08	0,075	0,07	0,06	13,65	0,98
1,30	42,78	48,52	52,34	58,07	12,21	12,38	12,78	14,09	0,08	0,081	0,07	0,07	13,65	1,06
1,40	42,92	49,06	53,16	59,30	12,07	11,84	11,96	12,86	0,08	0,084	0,08	0,07	13,65	1,12
1,50	42,99	49,34	53,57	59,92	12,00	11,56	11,55	12,24	0,08	0,086	0,08	0,08	13,65	1,15
1,60	43,05	49,61	53,98	60,53	11,94	11,29	11,14	11,63	0,08	0,089	0,09	0,08	13,65	1,18
1,70	43,19	50,15	54,80	61,76	11,80	10,75	10,32	10,40	0,08	0,093	0,09	0,09	13,65	1,26
1,80	43,33	50,70	55,62	62,99	11,66	10,20	9,50	9,17	0,09	0,098	0,10	0,10	13,65	1,35
1,90	43,46	51,25	56,43	64,22	11,53	9,65	8,69	7,94	0,09	0,104	0,11	0,12	13,65	1,47
2,00	43,60	51,79	57,25	65,45	11,39	9,11	7,87	6,71	0,09	0,110	0,12	0,14	13,65	1,61

## Cálculo de la curva característica de la celda "C"

**Tabla 32.** Cálculo de la curva característica de la celda "C".

L/G	ha(A)	ha(B)	ha(C)	ha(D)	$\Delta A$	$\Delta B$	$\Delta C$	$\Delta D$	A	B	C	D	$\Delta T$	KaV/L
0,50	41,46	43,55	44,94	47,02	13,04	16,87	19,83	24,73	0,08	0,059	0,050	0,040	13,88	0,78
0,60	41,60	44,10	45,77	48,27	12,90	16,32	18,99	23,48	0,08	0,061	0,053	0,043	13,88	0,81
0,70	41,74	44,66	46,60	49,52	12,76	15,76	18,16	22,23	0,08	0,063	0,055	0,045	13,88	0,83
0,80	41,88	45,21	47,43	50,77	12,62	15,21	17,33	20,98	0,08	0,066	0,058	0,048	13,88	0,86
0,90	42,02	45,77	48,27	52,02	12,48	14,65	16,49	19,73	0,08	0,068	0,061	0,051	13,88	0,90
1,00	42,16	46,32	49,10	53,27	12,34	14,10	15,66	18,49	0,08	0,071	0,064	0,054	13,88	0,93
1,15	42,44	47,43	50,77	55,76	12,06	12,99	13,99	15,99	0,08	0,077	0,071	0,063	13,88	1,02
1,23	42,48	47,60	51,01	56,13	12,02	12,82	13,75	15,62	0,08	0,078	0,073	0,064	13,88	1,03
1,30	42,71	48,54	52,43	58,26	11,79	11,88	12,33	13,49	0,08	0,084	0,081	0,074	13,88	1,12
1,40	42,73	48,60	52,52	58,39	11,77	11,82	12,24	13,36	0,08	0,085	0,082	0,075	13,88	1,13
1,50	42,85	49,10	53,27	59,51	11,65	11,32	11,50	12,24	0,09	0,088	0,087	0,082	13,88	1,19
1,60	42,99	49,66	54,10	60,76	11,51	10,76	10,66	10,99	0,09	0,093	0,094	0,091	13,88	1,26
1,70	43,13	50,21	54,93	62,01	11,37	10,21	9,83	9,74	0,09	0,098	0,102	0,103	13,88	1,35
1,80	43,27	50,77	55,76	63,26	11,23	9,65	9,00	8,49	0,09	0,104	0,111	0,118	13,88	1,46
1,90	43,41	51,32	56,60	64,51	11,09	9,10	8,16	7,24	0,09	0,110	0,123	0,138	13,88	1,59
2,00	43,55	51,88	57,43	65,76	10,95	8,54	7,33	5,99	0,09	0,117	0,136	0,167	13,88	1,77

## Cálculo de la curva característica de la celda "D"

**Tabla 33.** Cálculo de la curva característica de la Celda "D".

L/G	ha(A)	ha(B)	ha(C)	ha(D)	$\Delta A$	$\Delta B$	$\Delta C$	$\Delta D$	A	B	C	D	$\Delta T$	KaV/L
0,50	39,25	40,91	42,02	43,67	17,54	20,71	23,11	27,08	0,06	0,048	0,043	0,037	11,05	0,51
0,60	39,36	41,35	42,68	44,67	17,43	20,27	22,44	26,08	0,06	0,049	0,045	0,038	11,05	0,52
0,70	39,47	41,79	43,34	45,66	17,32	19,83	21,78	25,09	0,06	0,050	0,046	0,040	11,05	0,53
0,80	39,58	42,24	44,00	46,66	17,21	19,38	21,12	24,09	0,06	0,052	0,047	0,042	11,05	0,54
0,90	39,69	42,68	44,67	47,65	17,10	18,94	20,45	23,10	0,06	0,053	0,049	0,043	11,05	0,56
1,00	39,81	43,12	45,33	48,65	16,99	18,50	19,79	22,11	0,06	0,054	0,051	0,045	11,05	0,57
1,15	40,03	44,00	46,66	50,63	16,76	17,62	18,46	20,12	0,06	0,057	0,054	0,050	11,05	0,60
1,23	40,06	44,13	46,85	50,92	16,73	17,49	18,27	19,83	0,06	0,057	0,055	0,050	11,05	0,61
1,30	40,25	44,89	47,98	52,62	16,54	16,73	17,14	18,13	0,06	0,060	0,058	0,055	11,05	0,64
1,40	40,26	44,93	48,05	52,72	16,53	16,69	17,07	18,03	0,06	0,060	0,059	0,055	11,05	0,64
1,50	40,36	45,33	48,65	53,62	16,43	16,29	16,48	17,13	0,06	0,061	0,061	0,058	11,05	0,66
1,60	40,47	45,77	49,31	54,61	16,32	15,85	15,81	16,14	0,06	0,063	0,063	0,062	11,05	0,68
1,70	40,58	46,21	49,97	55,61	16,21	15,41	15,15	15,14	0,06	0,065	0,066	0,066	11,05	0,71
1,80	40,69	46,66	50,63	56,60	16,10	14,96	14,49	14,15	0,06	0,067	0,069	0,071	11,05	0,74
1,90	40,80	47,10	51,30	57,60	15,99	14,52	13,82	13,15	0,06	0,069	0,072	0,076	11,05	0,77
2,00	40,91	47,54	51,96	58,59	15,88	14,08	13,16	12,16	0,06	0,071	0,076	0,082	11,05	0,80

## Cálculo de la curva característica de la celda "F"

**Tabla 34.** Cálculo de la curva característica de la celda "F".

L/G	ha(A)	ha(B)	ha(C)	ha(D)	$\Delta A$	$\Delta B$	$\Delta C$	$\Delta D$	A	B	C	D	$\Delta T$	KaV/L
0,50	42,88	44,61	45,76	47,49	13,78	17,17	19,68	23,87	0,07	0,058	0,051	0,042	11,54	0,645
0,60	42,99	45,07	46,45	48,53	13,67	16,71	18,99	22,83	0,07	0,060	0,053	0,044	11,54	0,662
0,70	43,11	45,53	47,15	49,57	13,55	16,25	18,29	21,79	0,07	0,062	0,055	0,046	11,54	0,681
0,80	43,22	45,99	47,84	50,61	13,44	15,79	17,60	20,75	0,07	0,063	0,057	0,048	11,54	0,700
0,90	43,34	46,45	48,53	51,65	13,32	15,33	16,91	19,71	0,08	0,065	0,059	0,051	11,54	0,722
1,00	43,45	46,92	49,22	52,69	13,21	14,86	16,22	18,67	0,08	0,067	0,062	0,054	11,54	0,745
1,15	43,68	47,84	50,61	54,76	12,98	13,94	14,83	16,60	0,08	0,072	0,067	0,060	11,54	0,798
1,23	43,72	47,97	50,81	55,06	12,94	13,81	14,63	16,30	0,08	0,072	0,068	0,061	11,54	0,806
1,30	43,92	48,76	51,99	56,84	12,74	13,02	13,45	14,52	0,08	0,077	0,074	0,069	11,54	0,861
1,40	43,93	48,81	52,06	56,94	12,73	12,97	13,38	14,42	0,08	0,077	0,075	0,069	11,54	0,865
1,50	44,03	49,22	52,69	57,88	12,63	12,56	12,75	13,48	0,08	0,080	0,078	0,074	11,54	0,898
1,60	44,15	49,69	53,38	58,92	12,51	12,09	12,06	12,44	0,08	0,083	0,083	0,080	11,54	0,940
1,70	44,26	50,15	54,07	59,96	12,40	11,63	11,37	11,40	0,08	0,086	0,088	0,088	11,54	0,987
1,80	44,38	50,61	54,76	60,99	12,28	11,17	10,68	10,37	0,08	0,090	0,094	0,096	11,54	1,042
1,90	44,49	51,07	55,46	62,03	12,17	10,71	9,98	9,33	0,08	0,093	0,100	0,107	11,54	1,105
2,00	44,61	51,53	56,15	63,07	12,05	10,25	9,29	8,29	0,08	0,098	0,108	0,121	11,54	1,179

## ANEXO F. VALORES DE KaV/L CARACTERÍSTICO, DE DISEÑO Y DE OPERACIÓN DE TE-4401

**Tabla 35.** L/G y KaV/L característico, de diseño y de operación de TE-4401.

L/G	KaV/L Diseño	KaV/L Característica	KaV/L Operación
0,50	4,119	0,638	1,652
0,60	3,692	0,655	1,481
0,70	3,366	0,673	1,350
0,80	3,106	0,693	1,246
0,90	2,895	0,714	1,161
1,00	2,717	0,737	1,090
1,10	2,566	0,761	0,963
1,23	2,401	0,797	0,931
1,30	2,321	0,818	0,891
1,40	2,220	0,851	0,870
1,50	2,130	0,887	0,855
1,60	2,050	0,928	0,822
1,70	1,976	0,974	0,793
1,80	1,910	1,027	0,766
1,90	1,849	1,088	0,742
2,00	1,793	1,161	0,719

**Tabla 36.** L/G y KaV/L característico, de diseño y de operación de la Celda "A".

L/G	Kav/L Diseño	KaV/L Característica	KaV/L Operación
0,50	4,119	0,919	1,983
0,60	3,692	0,952	1,778
0,70	3,366	0,988	1,621
0,80	3,106	1,028	1,496
0,90	2,895	1,072	1,394
1,00	2,717	1,121	1,308
1,15	2,499	1,206	1,156
1,23	2,401	1,258	1,118
1,30	2,321	1,310	1,069
1,40	2,220	1,394	1,065
1,50	2,130	1,493	1,026
1,60	2,050	1,612	0,987
1,70	1,976	1,761	0,952
1,80	1,910	1,954	0,920
1,90	1,849	2,216	0,890
2,00	1,793	2,606	0,863

**Tabla 37.** L/G y KaV/L característico, de diseño y de operación de la Celda "B".

L/G	Kav/L Diseño	KaV/L Característica	KaV/L Operación
0,5	4,119	0,756	2,281
0,6	3,692	0,780	2,044
0,7	3,366	0,805	1,864
0,8	3,106	0,832	1,720
0,9	2,895	0,862	1,603
1	2,717	0,894	1,505
1,2	2,436	0,970	1,349
1,229	2,401	0,982	1,330
1,4	2,220	1,065	1,230
1,5	2,130	1,122	1,180
1,55	2,089	1,154	1,157
1,6	2,050	1,188	1,135
1,7	1,976	1,266	1,094
1,8	1,910	1,359	1,058
1,9	1,849	1,472	1,024
2	1,793	1,617	0,993

**Tabla 38.** L/G y KaV/L característico, de diseño y de operación de celda "C".

L/G	Kav/L Diseño	KaV/L Característica	KaV/L Operación
0,5	4,119	0,787	2,116
0,6	3,692	0,812	1,897
0,7	3,366	0,839	1,729
0,8	3,106	0,869	1,596
0,9	2,895	0,901	1,487
1	2,717	0,937	1,396
1,2	2,436	1,020	1,251
1,229	2,401	1,034	1,234
1,4	2,220	1,126	1,141
1,41	2,211	1,132	1,136
1,5	2,130	1,190	1,095
1,6	2,050	1,265	1,053
1,7	1,976	1,355	1,015
1,8	1,910	1,463	0,981
1,9	1,849	1,599	0,950
2	1,793	1,776	0,921

**Tabla 39.** L/G y KaV/L característico, de diseño y de operación de la Celda "D".

L/G	Kav/L Diseño	KaV/L Característica	KaV/L Operación
0,5	4,119	0,512	1,345
0,6	3,692	0,524	1,206
0,7	3,366	0,536	1,099
0,8	3,106	0,549	1,015
0,9	2,895	0,562	0,945
1	2,717	0,577	0,888
1,2	2,436	0,609	0,796
1,229	2,401	0,614	0,784
1,4	2,220	0,646	0,725
1,41	2,211	0,648	0,722
1,5	2,130	0,667	0,696
1,6	2,050	0,689	0,669
1,7	1,976	0,714	0,646
1,8	1,910	0,742	0,624
1,9	1,849	0,773	0,604
2	1,793	0,807	0,586

**Tabla 40.** L/G y KaV/L característico, de diseño y de operación de la Celda "F".

L/G	Kav/L diseño	KaV/L característica	KaV/L Operación
0,5	4,119	0,645	1,327
0,6	3,692	0,662	1,189
0,7	3,366	0,681	1,084
0,8	3,106	0,700	1,001
0,9	2,895	0,722	0,933
1	2,717	0,745	0,875
1,2	2,436	0,798	0,785
1,229	2,401	0,806	0,774
1,4	2,220	0,861	0,715
1,41	2,211	0,865	0,712
1,5	2,130	0,898	0,686
1,6	2,050	0,940	0,660
1,7	1,976	0,987	0,637
1,8	1,910	1,042	0,615
1,9	1,849	1,105	0,596
2	1,793	1,179	0,578