

**DIAGNÓSTICO DE LAS CONDICIONES OPERACIONALES Y PROPUESTA DE
MEJORA DE LA EFICIENCIA DE LA TORRE ENFRIADORA STE-2945.**

LEONARDO JAVIER BAYONA RUBIANO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA
2016**

**DIAGNÓSTICO DE LAS CONDICIONES OPERACIONALES Y PROPUESTA DE
MEJORA DE LA EFICIENCIA DE LA TORRE ENFRIADORA STE-2945.**

LEONARDO JAVIER BAYONA RUBIANO

**Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar el título de
Magíster en Ingeniería Química
Convenio UIS - ECOPETROL S.A.**

**Director
MSc. CRISOSTOMO BARAJAS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA
2016**

AGRADECIMIENTOS

A DIOS, porque sin el nada de esto hubiera sido posible, porque me da fuerzas en los momentos difíciles y siempre está presente en los momentos más importantes de mi vida, gracias a él ocupo un lugar privilegiado en éste mundo.

A mi esposa DIANA LUZ, por su tolerancia y compañía incondicional en cada momento de mi vida, por compartir momentos felices y tristes a mi lado siempre con una voz alentadora para continuar adelante, y porque sus sacrificios y sufrimientos me han enseñado el significado del Amor y me han impulsado a seguir adelante.

A mis hijos LEONARDO Y DANIEL, por entender que debo salir adelante con el apoyo de toda la familia y darme apoyo a seguir adelante; siempre cuento con ellos en los momentos difíciles y en todos los momentos de mi vida siempre están presentes.

A mi Madre GENNY, porque su sacrificio y sufrimiento me han enseñado el significado del Amor y me han impulsado a seguir adelante, además ha depositado un voto de confianza en mí.

A mis HERMANAS y AMIGOS, por su ayuda incondicional en todos los momentos que enriquecieron mi paso por sus vidas y por la universidad donde siempre logramos trabajar en equipo.

A mí segunda casa la UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER, porque a través de mi experiencia dentro de ésta, he tenido la oportunidad de desarrollar, consolidar y descubrir mis propias habilidades venciendo las barreras que se me presentaban.

A mi director de proyecto: MSc. CRISOSTOMO BARAJAS, por su direccionamiento y oportunos consejos, también por su paciencia y acompañamiento permanente.

A todos aquellos que me ayudaron a sacar este proceso adelante y que por extensión no podría nombrar.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.	21
1. MARCO TEÓRICO.	22
1.1 RENDIMIENTO Y EFICIENCIA.	24
1.2 ECUACIÓN DE MERKEL.	25
1.3 COEFICIENTE KaV/L .	26
1.4 FACTOR L/G .	27
1.5 EFICIENCIA DE LA TORRE ENFRIADORA.	27
1.6 Balance de agua.	28
1.6.1 Ciclos de concentración de la torre enfriadora.	28
1.6.2 Evaporación.	29
2. METODOLOGÍA.	30
2.1 DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD DE ENFRIAMIENTO DE LA TORRE ENFRIADORA.	30
2.2 PROCEDIMIENTO EJECUTADO PARA LA RECOLECCIÓN DE LAS MUESTRAS.	31
2.3 INSTRUMENTACIÓN Y EQUIPOS.	32
2.4 DATOS DE PARTIDA.	32
2.5 DATOS DE CAMPO.	33
2.6 BALANCE DE ENERGÍA	37
2.6.1 Balance global en la columna.	37
2.6.2 Balance global de entalpía	37
2.6.3 Determinación del KaV/L .	39
2.6.4 Determinación del L/G .	40
2.7 BALANCE DE AGUA.	41
2.8 CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA.	42
2.8.1 Consumo energético de los Ventiladores de tiro inducido.	42
2.8.2 Potencia requerida por los ventiladores de tiro inducido.	43
2.8.3 Bombas centrifugas.	43
2.9 ZONA EMPACADA.	43
2.10 ELIMINADORES DE GOTAS.	44
2.11 RECIRCULACIÓN DE AIRE.	44
2.12 BALANCE ECONÓMICO.	45
2.12.1 Histórico de costos operacionales en dinero presente de la STE-2945.	45
2.12.2 Situación actual de la torre enfriadora STE-2945.	48
2.12.3 Propuestas económicas STE-2945.	48

	Pág.	
2.13	ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS.	50
2.13.1	Base de datos.	51
2.13.2	Coeficiente de correlación.	51
2.13.3	Regresión.	54
2.14	MODELO OPERACIONAL.	58
2.14.1	Relación de variables.	58
2.14.2	Manejo de purgas.	59
2.14.3	Identificación y solución de problemas.	60
3.	RESULTADOS Y ANÁLISIS.	68
3.1	CÁLCULO DE LA EVAPORACIÓN.	68
3.2	CÁLCULO DE RESTITUCIÓN DE AGUA.	68
3.3	CÁLCULO DE RECIRCULACIÓN DE AIRE.	70
3.4	MEDICIONES DE AIRE EN CADA CELDA.	71
3.5	MEDICIONES DE POTENCIA DE LOS VENTILADORES DE TIRO INDUCIDO.	72
3.6	CÁLCULO DE POTENCIA DE LAS BOMBAS CENTRIFUGAS DE LA TORRE ENFRIADORA.	73
3.7	DETERMINACIÓN DEL L/G.	74
3.8	DETERMINACIÓN DEL KaV/L.	75
3.8.1	Determinación de KaV/L en cada celda.	77
3.9	EFICIENCIA DE CADA UNA DE LAS CELDAS DE LA TORRE ENFRIADORA.	78
3.9.1	Determinación de la Curva característica de cada celda.	78
3.10	CÁLCULO DEL CALOR REMOVIDO EN LA TORRE ENFRIADORA.	79
3.11	CURVA CARACTERÍSTICA DE LAS CONDICIONES DE DISEÑO STE-2945.	80
3.11.1	Cálculo de la constante de la curva de Diseño de la STE-2945.	80
3.11.2	Cálculo de la curva característica de la STE-2945.	82
3.11.3	Curva de operación de la torre enfriadora.	83
3.12	CÁLCULO DE LA CURVA CARACTERÍSTICA DE LA CELDA A.	85
3.13	CÁLCULO DE LA CURVA CARACTERÍSTICA DE LA CELDA B.	88

		Pág.
3.14	CÁLCULO DE LA CURVA CARACTERÍSTICA DE LA CELDA C.	91
3.15	CÁLCULO DE LA CURVA CARACTERÍSTICA DE LA CELDA F.	94
3.16	CÁLCULO DE LA CURVA CARACTERÍSTICA DE LA CELDA G.	97
3.17	CÁLCULO DE LA CURVA CARACTERÍSTICA DE LA CELDA I.	100
3.18	CÁLCULO DE LA CURVA CARACTERÍSTICA DE LA CELDA J.	103
4.	CONCLUSIONES.	107
5.	RECOMENDACIONES.	108
	BIBLIOGRAFIA	110
	ANEXOS	112

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Representación del proceso de enfriamiento en contraflujo.	23
Figura 2. Hipótesis de Merkel.	25
Figura 3. Relación de las entalpías con la temperatura.	26
Figura 4. Enfriamiento en contraflujo.	27
Figura 5. Diagrama del circuito típico de la torre enfriadora.	28
Figura 6. Proceso de enfriamiento.	30
Figura 7. Puntos toma muestra de velocidades en cada celda.	36
Figura 8. Balance de materia y energía.	37
Figura 9. Recirculación de aire.	44
Figura 10. Histórico de costos operacionales en dinero presente de la STE-2945.	46
Figura 11. Tendencia de los costos de la energía eléctrica.	46
Figura 12. Tendencia de los costos del kilo-galón de agua de enfriamiento.	47
Figura 13. Tendencia de los flujos de agua de restitución por año.	47
Figura 14. Proyección de costos 2016.	50
Figura 15. Restitución de agua proyectada para el año 2016.	50
Figura 16. Análisis estadístico del comportamiento térmico.	56
Figura 17. Análisis estadístico de los coeficientes.	58
Figura 18. Régimen de purga.	59
Figura 19. Curva de diseño STE-2945.	82
Figura 20. Curva Característica STE-2945.	83
Figura 21. Curva de diseño, Característica y de operación de la STE-2945.	84
Figura 22. Curva característica celda A.	86
Figura 23. Curva de diseño, Característica y de operación de la celda A.	87
Figura 24. Curva característica celda B.	89
Figura 25. Curva de diseño, Característica y de operación de la celda B.	90
Figura 26. Curva característica celda C.	92
Figura 27. Curva de diseño, Característica y de operación de la celda C.	93
Figura 28. Curva característica celda F.	95

	Pág.
Figura 29. Curva de diseño, Característica y de operación de la celda F.	96
Figura 30. Curva característica celda G.	98
Figura 31. Curva de diseño, Característica y de operación de la celda G.	99
Figura 32. Curva característica celda I.	101
Figura 33. Curva de diseño, Característica y de operación de la celda I.	102
Figura 34. Curva característica celda J.	104
Figura 35. Curva de diseño, Característica y de operación de la celda J.	105

LISTA DE CUADROS

	Pág.
Cuadro 1. Datos de diseño de la torre enfriadora STE-2945.	33
Cuadro 2. Datos de los equipos de rotativos.	33
Cuadro 3. Datos de campo.	34
Cuadro 4. Datos promedios de campo.	35
Cuadro 5. Temperaturas de retorno y salida del agua.	35
Cuadro 6. Temperaturas del aire de la STE-2945.	35
Cuadro 7. Humedad relativa STE-2945.	36
Cuadro 8. Toma de velocidades en cada celda.	36
Cuadro 9. Histórico de costos operacionales en dinero presente de la STE-2945.	45
Cuadro 10. Situación actual de la torre enfriadora STE-2945.	48
Cuadro 11. Propuesta económica STE-2945.	48
Cuadro 12. Consolidado de costos energéticos STE-2945.	49
Cuadro 13. Proyección de costos 2016.	49
Cuadro 14. Base de datos análisis estadístico de datos 1.	51
Cuadro 15. Base de datos análisis estadístico de datos 2.	51
Cuadro 16. Porcentajes de correlación.	51
Cuadro 17. Coeficiente de correlación.	52
Cuadro 18. Análisis estadístico de la eficiencia de la torre enfriadora 1.	52
Cuadro 19. Análisis estadístico de la eficiencia de la torre enfriadora 2.	53
Cuadro 20. Análisis estadístico de la eficiencia de la torre enfriadora 3.	53
Cuadro 21. Datos requeridos para el análisis de regresión.	54
Cuadro 22. Regresión estadística.	54
Cuadro 23. Análisis de varianza.	55
Cuadro 24. Coeficientes análisis de varianza.	55
Cuadro 25. Análisis de los residuales.	55
Cuadro 26. Análisis estadísticos de los coeficientes de transferencia.	56
Cuadro 27. Estadísticas de regresión de los coeficientes de transferencia.	56
Cuadro 28. Análisis de varianza de los coeficientes de transferencia.	57
Cuadro 29. Análisis de residuales de los coeficientes de transferencia.	57

	Pág.	
Cuadro 30.	Relaciones entre variables claves.	58
Cuadro 31.	Presencia de hidrocarburo en las celdas.	60
Cuadro 32.	Aumento en la velocidad de corrosión sobre las superficies metálicas.	60
Cuadro 33.	Lluvia constante alrededor de la torre enfriadora.	61
Cuadro 34.	Caudal de agua cae en forma de cascada.	61
Cuadro 35.	Obstrucción en tuberías y equipos por presencia microbiológica.	61
Cuadro 36.	Canalización, flujos anormales o cortes en la cascada de agua.	62
Cuadro 37.	Purga abierta.	62
Cuadro 38.	Suciedad en el relleno.	63
Cuadro 39.	Ruido anormal o percepción de vibración estructural.	63
Cuadro 40.	Ruido anormal en el ventilador.	64
Cuadro 41.	Formación de niebla.	64
Cuadro 42.	Altos flujos de purga de lodos.	64
Cuadro 43.	La temperatura del agua sale muy caliente y se requiere eliminar mayor cantidad de calor.	65
Cuadro 44.	Elevados ciclos de concentración.	65
Cuadro 45.	Purga caliente se mantiene abierta aun con los ciclos y la conductividad en control.	65
Cuadro 46.	Salida de agua por tubos de alivio de los distribuidores.	66
Cuadro 47.	Presencia de incrustaciones en la tubería del sistema.	66
Cuadro 48.	Agua con altos valores de turbiedad (>30 NTU).	66
Cuadro 49.	Crecimiento microbiológico.	67
Cuadro 50.	Alta concentración de aluminio.	67
Cuadro 51.	Cálculo de evaporación del agua.	68
Cuadro 52.	Pérdidas de agua.	69
Cuadro 53.	Restitución de agua.	70
Cuadro 54.	Cálculos para determinar el porcentaje de recirculación.	71
Cuadro 55.	Mediciones de aire.	71
Cuadro 56.	Datos de operación de los ventiladores de tiro inducido.	72
Cuadro 57.	Datos de operación de las bombas centrifugas.	73
Cuadro 58.	Resultados de L/G para cada una de las celdas.	74
Cuadro 59.	Cálculos requeridos para calcular el KaV/L.	75

	Pág.
Cuadro 60.	Cálculos adicionales para hallar el KaV/L . 75
Cuadro 61.	Cálculos para determinar hw . 75
Cuadro 62.	Determinación del hw . 76
Cuadro 63.	Cálculos para determinar h_2 . 76
Cuadro 64.	Determinación del h_a . 76
Cuadro 65.	Relación de entalpías. 77
Cuadro 66.	Determinación de KaV/L . 77
Cuadro 67.	Cálculo de Eficiencia STE-2945. 78
Cuadro 68.	Determinación de la curva característica. 78
Cuadro 69.	Remoción de calor en MBTU/H. 79
Cuadro 70.	Retiro de calor en unidades de proceso. 80
Cuadro 71.	Eficiencia de retiro de calor. 80
Cuadro 72.	Cálculo de la constante de la curva de Diseño. 81
Cuadro 73.	Determinación del KaV/L de la STE-2945. 82
Cuadro 74.	Cálculos curva de operación STE-2945. 83
Cuadro 75.	Relación del L/G con el coeficiente de transferencia STE-2945. 84
Cuadro 76.	Eficiencia de la STE-2945. 85
Cuadro 77.	Determinación del KaV/L de la celda A 86
Cuadro 78.	Cálculos curva de operación de la celda A. 87
Cuadro 79.	Relación del L/G con el coeficiente de transferencia para la celda A. 87
Cuadro 80.	Eficiencia de la celda A. 88
Cuadro 81.	Determinación del KaV/L de la celda B. 89
Cuadro 82.	Cálculos curva de operación de la celda B. 90
Cuadro 83.	Relación del L/G con el coeficiente de transferencia para la celda B. 90
Cuadro 84.	Eficiencia de la celda B. 91
Cuadro 85.	Determinación del KaV/L de la celda C. 92
Cuadro 86.	Cálculos curva de operación de la celda C. 92
Cuadro 87.	Relación del L/G con el coeficiente de transferencia para la celda C. 93
Cuadro 88.	Eficiencia de la celda C. 93
Cuadro 89.	Determinación del KaV/L de la celda F. 94
Cuadro 90.	Cálculos curva de operación de la celda F. 95
Cuadro 91.	Relación del L/G con el coeficiente de transferencia para la celda F. 96

	Pág.
Cuadro 92. Eficiencia de la celda F.	96
Cuadro 93. Determinación del KaV/L de la celda G.	97
Cuadro 94. Cálculos curva de operación de la celda G.	98
Cuadro 95. Relación del L/G con el coeficiente de transferencia para la celda G.	99
Cuadro 96. Eficiencia de la celda G.	99
Cuadro 97. Determinación del KaV/L de la celda I.	100
Cuadro 98. Cálculos curva de operación de la celda I.	101
Cuadro 99. Relación del L/G con el coeficiente de transferencia para la celda I.	102
Cuadro 100. Eficiencia de la celda I.	103
Cuadro 101. Determinación del KaV/L de la celda J.	103
Cuadro 102. Cálculos curva de operación de la celda J.	104
Cuadro 103. Relación del L/G con el coeficiente de transferencia para la celda J.	105
Cuadro 104. Eficiencia de la celda J.	105

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Apéndices.	113
Anexo B. Imágenes de las boquillas de la celda A; B C y D.	121
Anexo C. Imágenes de las boquillas de la celda E; F; G; H; I y J.	122
Anexo D. Imágenes de las boquillas en operación de la celda E; F; G; H; I y J.	123
Anexo E. Imágenes del relleno de las celdas E; F; G; H; I y J.	124
Anexo F. Imágenes del estado de los distribuidores de las celdas E; F; G; H; I y J.	125
Anexo G. Imágenes de distribuidores dañados en las celdas H; I y J.	126
Anexo H. Imágenes de los atrapa neblinas de las celdas E; F; G; H; I y J.	127
Anexo I. Imágenes de los atrapa neblinas de las celdas A; B; C y D.	128
Anexo J. Imágenes de los sistemas de alivio de las celdas A; B; C y D.	129
Anexo K. Imágenes de la operación de los sistemas de alivio de las celdas A; B; C y D.	130
Anexo L. Imágenes de los motores y ventiladores de tiro inducido.	131
Anexo M. Imágenes del manejo de las purgas en la torre enfriadora.	132
Anexo N. Imágenes de la operación de la celda J.	133
Anexo O. Imágenes de la operación de la celda G.	134
Anexo P. Imágenes de la operación de la celda F.	135
Anexo Q. Imágenes de la operación de la celda C.	136

GLOSARIO

AGUA DE CIRCULACIÓN. Cantidad de agua caliente que entra a la torre de enfriamiento.

AGUA DE RESTITUCIÓN: Cantidad de agua añadida al agua de circulación para reemplazar el agua que se pierde en el sistema por la evaporación, el arrastre, la purga, etc.

AIRE ENTRANTE: Aire de la atmósfera que rodea a la torre de enfriamiento, el cual entra a través de las persianas en una torre de tiro inducido.

AIRE EXHAUSTO: Es la mezcla de aire que está asociada con el vapor de agua que deja la torre.

APROXIMACIÓN: Diferencia entre la temperatura del agua fría y la temperatura del bulbo húmedo.

ARRASTRE: Es la pérdida de agua como gotas de agua mezcladas con aire exhausto.

Boquillas: Dispositivo utilizado para controlar la distribución del agua en la parte superior de una torre de enfriamiento. Las boquillas están diseñadas para suministrar agua en forma de rocío (spray) si es a presión.

BTU: (British Thermal Unit). Es la cantidad de calor requerida para aumentar la temperatura de una libra de agua en 1° F.

CABEZAL: Tubo principal que conduce el agua a cada celda o a la tubería del sistema de distribución en cada celda.

CALOR HÚMEDO: Es el calor necesario para elevar la temperatura del aire seco y el agua un grado.

CALOR LATENTE DE EVAPORACIÓN: Es el calor requerido para elevar la temperatura de un líquido convirtiéndolo en vapor sin cambiar su presión o temperatura.

CALOR SENSIBLE: Es el calor requerido para cambiar la temperatura del agua o el aire.

CÁMARA PLENA: Espacio cerrado entre los eliminadores y el piso del ventilador en una torre de tiro inducido.

CAPACIDAD TÉRMICA: Es el flujo o gasto que puede manejar una torre de enfriamiento para un rango específico, una temperatura de bulbo húmedo y una aproximación determinada.

CARGA DE CALOR: Calor removido del agua de recirculación en la torre de enfriamiento.

CELDA: La subdivisión más pequeña de una torre de enfriamiento, la cual puede funcionar de manera independiente. Está limitada por paredes exteriores o particiones.

DENSIDAD DEL AIRE: es la cantidad de masa aire por unidad de volumen.

ELIMINADOR DE ARRASTRE: Es un ensamble fabricado en PVC el cual sirve para remover la humedad localizada en la zona de descarga de aire.

ENSAMBLE EQUIPO MECÁNICO: Conjunto de componentes mecánicos que transmite potencia al ventilador, consiste normalmente de motor eléctrico, flecha de transmisión y reductor de velocidad.

ENTALPÍA: es el calor contenido en el aire y el vapor de agua expresado en BTU'S.

ENTRADA DE AIRE: Área abierta en una torre de enfriamiento a través de la cual el aire entra a la torre de enfriamiento.

FLUJO DE AIRE: Kilogramos o libras de aire seco que fluyen a través de un metro cuadrado o pie cuadrado de un área de relleno en un minuto.

FLUJO DE AGUA: Variable elemental; es la cantidad de agua que va a circular por la torre.

HUMEDAD RELATIVA: es el cociente de la presión parcial del vapor de agua en aire dividido por la presión de vapor a la misma temperatura.

HUMEDAD ABSOLUTA: son las libras de agua transportada por una libra de aire seco.

PÉRDIDAS DE EVAPORACIÓN: Agua evaporada del agua de circulación en el proceso de enfriamiento. Unidad: % del agua de circulación.

PISCINA DE AGUA FRÍA: Elemento estructural localizado en la parte inferior de la torre de enfriamiento para recibir el agua fría de la torre y dirigirla a una línea de succión.

POTENCIA: Es la relación de paso de energía por unidad de tiempo; es decir, la cantidad de energía entregada por un elemento en un tiempo determinado

PSICRÓMETRO: Instrumento utilizado principalmente para la medición de la temperatura de bulbo húmedo.

PUNTO DE ROCÍO: Se denomina punto de rocío de una masa de gas húmedo a la temperatura a la cuál es preciso enfriarla para alcanzar la saturación a presión constante. El punto de rocío de un gas saturado es igual a la temperatura del gas. Es también una medida indirecta de la presión de vapor y de la humedad absoluta si conocemos la presión total.

PURGA: Porción de agua que se retira del sistema de enfriamiento para controlar las concentraciones de sales u otras impurezas del agua de circulación.

RANGO O SALTO TÉRMICO: es la diferencia de temperaturas del agua a la entrada y salida de la torre.

RELLENO: Parte del sistema interno de la torre que consiste en hojas verticales de diferentes configuraciones con objeto de afectar la superficie de transferencia entre el agua de circulación y el aire que fluye hacia la torre de enfriamiento.

SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN: Son todas las partes de la torre de enfriamiento comenzando con la conexión de entrada, que reparten el agua caliente a la torre en las zonas donde el agua está en contacto con el aire.

TEMPERATURA DEL AGUA CALIENTE: Es la temperatura del agua en circulación al entrar a la torre de enfriamiento; está dada por las condiciones del proceso.

TEMPERATURA DE AGUA FRÍA: Es la temperatura del agua en circulación al salir de la torre y al igual que la anterior.

TEMPERATURA DE ROCÍO: Es la temperatura del aire en condiciones de saturación. Se evalúa determinando la temperatura de saturación a la presión de vapor en la mezcla. Cuando ocurre la saturación la temperatura de bulbo húmedo, seco y punto de rocío tienen el mismo valor.

TEMPERATURA DE BULBO HÚMEDO: Es la temperatura de equilibrio dinámico que se alcanza en la superficie del agua cuando el flujo del calor transferido a la superficie por convección se iguala con el flujo de masa transferida fuera de la superficie.

VÁLVULA CONTROLADORA DE NIVEL: Válvula que actúa por medio de un controlador de nivel y permite asegurar el nivel de la piscina de la torre

VENTILADOR. Dispositivo para movimiento de aire en torres de enfriamiento de tiro mecánico. Fabricado con aspas de resina poliéster reforzado con fibra de vidrio.

VOLUMEN ESPECÍFICO: es el volumen ocupado por una cantidad de aire y vapor de agua que pesan exactamente una libra si se extrajo todo el vapor de agua.

VOLUMEN HÚMEDO: es el volumen de un pie cúbico de una libra de aire seco y vapor de agua en contacto.

TEMPERATURA DE BULBO SECO: Es la temperatura a la entrada o adyacente a la torre de enfriamiento medida con un termómetro de bulbo seco.

VÁLVULA DE CONTROL DE FLUJO: Válvula controlada manualmente, generalmente localizada en la línea de alimentación de agua caliente de entrada a cada una de las celdas de la torre enfriadora.

RESUMEN

TÍTULO: DIAGNÓSTICO DE LAS CONDICIONES OPERACIONALES Y PROPUESTA DE MEJORA DE LA EFICIENCIA DE LA TORRE ENFRIADORA STE-2945*.

AUTOR: Leonardo Javier Bayona Rubiano**.

PALABRAS CLAVES:

Torre de enfriamiento.
Tiro inducido.
Modelo operacional.
Modelo termodinámico.
Costos operacionales.

DESCRIPCIÓN:

Las torres de enfriamiento se han venido desarrollando paulatinamente con el desarrollo y adecuación de nuevas tecnologías, los dispositivos de enfriamiento han sido por décadas estudiados, implementados y dispuestos complementando las consideraciones y restricciones operativas presentes en las unidades de proceso asociados a la torre enfriadora. En el desarrollo del presente trabajo es importante entregar a los operadores herramientas para identificar y actuar ante los fenómenos evidenciados en la operación de la torre enfriadora.

La herramienta propuesta permite el cálculo del perfil de temperatura para el agua, el perfil de temperatura para el aire, el perfil de humedad y la demanda térmica a contracorriente en una torre de enfriamiento de agua de tiro inducido a contracorriente. Como un primer paso, se construye un modelo matemático, que rige el funcionamiento de una torre de enfriamiento de agua de tiro inducido a contracorriente. El modelo matemático estructurado contiene ecuaciones que describen los fenómenos de transferencia de masa, transferencia de calor, el balance de energía y la ecuación de equilibrio generada a partir de datos para el sistema aire-agua.

De la solución numérica se obtuvo el calor removido por la torre, la temperatura de agua fría, la temperatura del aire a la salida, la demanda térmica a contracorriente y los perfiles de temperatura para el agua. El presente trabajo desarrolla el diseño operacional para una torre de enfriamiento de tiro inducido a fin de ser implementada. Las ecuaciones de diseño del equipo en general se basan en la teoría del potencial entálpico descrita y desarrollada por Merkel, conforme a las normas establecidas por el Cooling Tower Institute.

* Proyecto de grado.

**Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingeniería Química, Maestría en Ingeniería Química. Director: Crisóstomo Barajas.

ABSTRACT

TITLE: DIAGNOSIS OF OPERATIONAL CONDITIONS AND TO IMPROVE THE EFFICIENCY OF THE COOLING TOWER

AUTHOR: Leonardo Javier Bayona Rubiano.

KEYWORDS:

Cooling tower induced shot.
Operational model.
Thermodynamic model.
Operational costs.

DESCRITION:

The cooling towers have been gradually developing with the improvement and adjustment of high-technologies, the evaporative cooling devices have been widely studied for several years, implemented and willing complementing the considerations and operational constraints present in the process units associated with the cooling tower. In the development of this work it is important to provide operators tools to identify and act upon the phenomena evident in the operation of the cooling tower.

The proposed tool permits the calculation of the temperature profile for water, the temperature profile for air, the humidity profile and the thermal demand to counter stream in an induced shot to counter stream water-cooling tower. As a first step, a mathematical model that governs the operation of a cooling tower water induced draft counter flow it is built. The structured mathematical model contains equations describing the phenomena of mass transference, heat transfer, the energy balance and the equilibrium equation generated from data to the air -water system.

From the numeric solution the removed heat of the tower is obtained, the percentage of lost water the temperature of cold water, the air temperature in the exit, the thermal demand to counter stream and the temperature profiles for water. The present document develops the operational design for an induced draft cooling tower in order to be applied for the process. The general design equations are based in the enthalpy potential theory proposed by Merkel according the established rules by the Cooling Tower Institute.

* Project of degree.

**Industrial University of Santander, School of Chemical Engineering, Mastery in Chemical Engineering. The director: Crisóstomo Barajas

INTRODUCCIÓN

La torre enfriadora STE-2945 tiene como función asegurar el retiro de calor del agua circulante que alimenta a los equipos de intercambio térmico en la unidad de balance de la refinería de Barrancabermeja de Ecopetrol S.A.

La operación de la torre enfriadora evidencia limitaciones para asegurar el 100% del retiro de calor del agua debido principalmente a las altas temperaturas en el agua de salida, altos consumos de energía eléctrica; alta presión en el sistema y daño en internos de las celdas.

El presente trabajo de investigación hace referencia al diagnóstico de las condiciones operacionales y emitir propuestas de mejora en la eficiencia de la torre enfriadora STE-2945 que permitan operar eficientemente a costos económicos razonables.

La actual dinámica ambiental denominada “el fenómeno del niño” está impactando negativamente al país y consecuentemente a las cuencas hídricas del área de Barrancabermeja, entonces se hace prioritario controlar los consumos de agua cruda y reutilizar la mayor cantidad este vital producto por la prioridad que tienen las comunidades en el abastecimiento del agua potable por encima de los requerimientos de la industria.

Dentro de las políticas de manejo ambiental adelantados en la compañía para la reducción en el consumo de agua está la reducción de la captación de agua cruda del río Magdalena a menos de 10.000 gpm y de la Ciénaga San Silvestre a valores inferiores a 2.000 gpm; esta última con gran relevancia por ser el recurso captado directamente para reponer agua a las torres enfriadoras de la unidad de balance y demás servicios industriales.

La torre enfriadora STE-2945 tiene un sobre consumo de agua asociado al modelo operacional, en el presente trabajo de aplicación se establecerá los parámetros de control en el consumo de agua y los parámetros físico – químicos deseados para reducir a valores razonables el agua de restitución a la torre enfriadora.

Las limitaciones operacionales de la torre enfriadora permiten evidenciar los altos costos en energía eléctrica y en el agua de restitución¹.

El objetivo principal del presente trabajo de aplicación es diagnosticar la condición operacional actual de la torre enfriadora STE-2945; obtener un método para la determinación de los cálculos de desempeño y proponer acciones que optimicen la operación con un impacto positivo en la reducción de costos de energía y reducción en el consumo de agua”

¹ CLARIANT. Aplicación Master Best Practices Sistema de Enfriamiento TE – 2945. SMIWT-3575. Ecopetrol SIBA. Bogotá, 12 de Diciembre de 2012.

1. MARCO TEÓRICO

La torre enfriadora fue diseñada para cubrir las necesidades de las unidades de proceso del área de balance de la Refinería de Barrancabermeja Ecopetrol. S.A

La torre de enfriamiento STE-2945 es un equipo que utiliza la transferencia de calor y masa para enfriar; es de tiro inducido donde el agua a ser enfriada se bombea hasta la parte superior de la torre y se distribuye en forma de gotas por boquillas de rociado, de esta manera se expone una gran superficie de agua al contacto directo con una corriente de aire atmosférico.

Las operaciones de transferencia de masa, energía y cantidad de movimiento ocurridas en sistemas de contacto líquido y vapor, constituyen un enfoque generalizado que han contribuido a lo largo del tiempo al mejoramiento e implementación de nuevos dispositivos mecánicos dentro de los procesos industriales actuales.

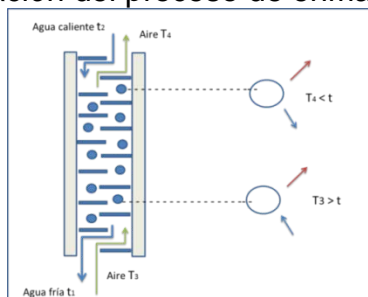
El aire atmosférico es utilizado como medio refrigerante por evaporación y es circulado por ventiladores, el agua caliente es enfriada al entregar calor por convección a una corriente de aire frío y sucede por la diferencia de temperaturas entre el agua que fluye y la corriente de aire. Debido a que existe un contacto directo entre los dos fluidos la torre enfriadora opera con un rendimiento térmico uniforme.

Las diferencias de temperatura entre el aire de entrada y el agua circulante permite generar potenciales que sirven para bajar la temperatura del agua por evaporación y la transferencia de calor sensible al aire, esto aumenta la entalpía del aire y dependiendo del volumen del aire y de la rata de evaporación permiten que la temperatura del agua de la piscina descienda a valores cercanos a la temperatura de bulbo húmedo.

El agua puede alcanzar temperaturas iguales o menores a la temperatura de bulbo seco del aire con el que se pone en contacto.

El límite al que la temperatura del agua de salida puede llegar en una torre de enfriamiento, es el que está adiabáticamente en equilibrio con el aire de entrada, dicho en otras palabras la temperatura límite del agua de salida será la temperatura de bulbo húmedo.

Figura 1. Representación del proceso de enfriamiento en contraflujo.



Fuente: Diseño de un sistema de agua de refrigeración en ciclo cerrado para una refinería de petróleo en Tarragona.

La figura 1 representa el cambio en el perfil térmico de la gota de agua a medida que atraviesa la zona del relleno para caer en la piscina de la torre enfriadora; igualmente se observa el incremento de temperatura del aire a medida que atraviesa el relleno hasta salir por el cono del ventilador.

La torre enfriadora STE-2945 tiene la capacidad instalada para enfriar en 30 °F para un caudal de 76,670 GPM de agua.

Los activos que forman parte del sistema de enfriamiento son:

1. Torre Enfriadora con diez celdas.
2. Bombas centrífugas con una capacidad por bomba de 23,000 gpm; en total son 6 bombas.
3. Ventiladores de tiro inducido; en total 10 ventiladores.
4. Tratamiento químico contratado.
5. Central de cloración.
6. Sub estaciones eléctricas ET-195 y ET-196.

El agua de reposición proviene del tratamiento dado en la planta de agua de la unidad de Balance donde le realizan el proceso de clarificación, cumpliendo parámetros de calidad no obstante es uno de los factores claves en la efectividad del proceso, ya que determina en gran medida la transferencia de calor y la correcta conservación del sistema.

El ingreso del agua caliente de las unidades de proceso entran por dos ramales a la torre donde es conducida hasta los distribuidores de cada una de las celdas y los aspersores pulverizan el agua en el interior de la torre atravesando el relleno de la misma, donde tendrá lugar la transferencia de calor del agua al aire con la consecuente enfriamiento de las gotas de agua, el agua enfriada caerá a la piscina de agua fría, mientras que el aire inducido por ventiladores de la torre atraviesan los separadores de gotas y el aire sale por los conos de cada una de las celdas del ventilador.

En la piscina de la torre enfriadora se realiza la inyección del cloro y del tratamiento químico de manera continua como anti incrustante; biocida y dispersantes

El agua fría de la piscina es succionada por bombas centrifugas accionada con motores sincrónicos operando cuatro bombas y dos en reserva; las bombas suministran la presión suficiente para alimentar las distintas unidades de proceso y superar la altura de la torre para volver a las celdas y vencer las pérdidas de carga del sistema de distribución.

Los ventiladores de la torre enfriadora STE-2945 marca Hansen consta de 11 aspas con una holgura máxima del 0,5% del diámetro del ventilador entre el aspa y la camisa del cono (área de sello), de acuerdo al estándar API- 661 o 19 mm entre la punta del aspa y la carcasa, mayores holguras generan recirculaciones que reducen la eficiencia y el rendimiento del ventilador.

Para el control de las variables operacionales se tiene medición de presión de descarga de las bombas, medición de temperatura en salida y retornos. Los controles químicos de la Torre Enfriadora son realizados en laboratorio industrial por el personal de operaciones.

En la ronda como rutina operacional por turno se realizan análisis de pH, dureza, cloro, aluminio, alcalinidad y se deduce el ciclo de concentración.

Los beneficios de las torres de inducción son principalmente:

- A. Control sobre el caudal de aire.
- B. Menor superficie a igualdad de condiciones operacionales.
- C. Control sobre la temperatura del agua fría.
- D. Se obtiene menor aproximación y mayores deltas de temperatura entre el agua entrante y saliente.
- E. Al tener gran diámetro los ventiladores, se reduce el ruido y la velocidad de los mismos.
- F. El tiro inducido permite mayores velocidades del aire a la salida de la torre, reduciendo el riesgo de recirculaciones.

1.1 RENDIMIENTO Y EFICIENCIA

La evaluación energética de una torre de enfriamiento puede simularse desde varios puntos de vista. El primero de ellos haciendo referencia a la eficiencia de la torre y puede calcularse como el cociente entre la energía retirada al agua y la máxima retirable.

Una eficiencia superior al 90 % refleja un buen desempeño de la torre, valores inferiores a este indican posibles problemas en:

- Deterioro de los rellenos,
- Altos flujos de agua.
- Flujos inadecuados de aire debido a fallas o ineficiencias de los ventiladores.
- Flujos inadecuados de agua por ineficiencias en la operación en las bombas, distribuciones de flujos.

La evaluación y simulación del rendimiento es una opción que brinda más información para la toma de decisiones es necesario aplicar el método de la curva característica de la torre, así como el valor de diseño L/G, la potencia demandada por el ventilador en las condiciones de diseño y la curva característica requerida de acuerdo a la operación del activo.

1.2 ECUACIÓN DE MERKEL

En una torre de refrigeración operando con flujo a contracorriente, hay dos principios básicos involucrados en la evacuación de calor del agua:

1. Cesión de calor sensible debido a una diferencia de temperaturas.
2. Transferencia de calor latente resultado de la evaporación de una parte del agua circulante.

Merkel desarrolló la ecuación del comportamiento de la torre basándose en estos dos principios.

El modelo se basa en el estudio de una gota de agua cayendo por el relleno de una torre de flujo a contracorriente, mientras que un caudal de aire no saturado a una temperatura de bulbo húmedo (T_{wb}) y con una entalpía (h_a) asciende proveniente de la atmósfera.

La gota de agua se supone rodeada por una película de aire saturado a la temperatura del agua (gota) con una entalpía de saturación (h_w). A medida que la gota baja por el relleno tienen lugar la transferencia de masa y calor desde la película de aire saturado que rodea la gota hasta el resto de la corriente de aire ascendente, enfriándose así el agua.

Figura 2. Hipótesis de Merkel.



Fuente: Diseño de un sistema de agua de refrigeración en ciclo cerrado para una refinería de petróleo en Tarragona.

La figura 2 representa la hipótesis de Merkel con las siguientes observaciones:

1. La película de aire saturado que rodea la gota no ofrece resistencia a la transferencia de calor.
2. La película de aire saturado está a la temperatura de la gota de agua.
3. El contenido de vapor en el aire es proporcional a la presión parcial.
4. El calor específico de la mezcla de vapor agua-aire y el calor de vaporización son constantes.
5. Todo el calor intercambiado entre el agua y el aire se hace en el relleno.
6. No hay pérdidas de calor hacia el exterior.
7. Los fluidos están en contracorriente pura.

A medida que la gota de agua desciende por el relleno tiene lugar la transferencia de masa y calor desde la película de aire saturado que rodea la gota hasta el resto de la corriente de aire que asciende.

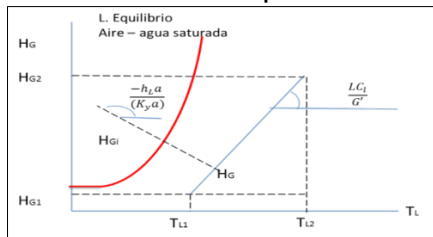
1.3 COEFICIENTE KaV/L

Con base en los valores registrados de temperatura de bulbo húmedo a la entrada (T_h), el agua caliente que entra a la torre (T_1), el agua fría que sale de la misma (T_2) y la relación de flujos L/G por integración numérica se calcula la eficiencia térmica de la torre enfriadora.

La figura 3 representa la relación entre las entalpías y las temperaturas que permiten evaluar la torre enfriadora y hallar los coeficientes necesarios para calcular el factor de transferencia térmica KaV

$/L$; conociendo las temperaturas de bulbo húmedo, el rango, la aproximación y la relación L/G permite hallar el KaV/L por el método de Tchebycheff de métodos de integración numérica.

Figura 3. Relación de las entalpías con la temperatura².



Fuente: Diseño de un sistema de agua de refrigeración en ciclo cerrado para una refinería de petróleo en Tarragona.

² Fuente: QUIROGA Alejandro. Diseño de un sistema de agua de refrigeración en ciclo cerrado para una refinería de petróleo en Tarragona. España, 2012. Pág. 124, Trabajo de grado (Ingeniero Mecánico). Escuela Técnica Superior de Ingeniería. ICAI.

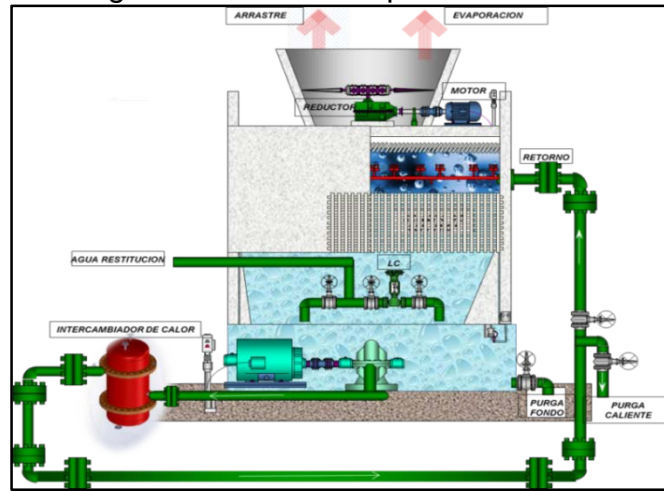
Experimentalmente se observa que el efecto de la variación en la velocidad del aire es mínimo, el valor L/G es el parámetro utilizado como factor para la curva característica.

1.6 BALANCE DE AGUA

En la figura 5 se observa el circuito total de agua circulante en la torre enfriadora; la calidad de agua que ingresa a la torre enfriadora contiene sólidos y especies químicas.

El balance de agua esta compensado por la restitución que se realiza debido a las perdidas ocasionadas por purgas, arrastres, retro lavados y evaporación, la pérdida total de agua es máximo el 2% del agua circulante.

Figura 5. Diagrama del circuito típico de la torre enfriadora.



Fuente: Manual de operación de las torres enfriadoras de la unidad de Balance.

1.6.1 Ciclos de concentración de la torre enfriadora. A medida que el agua se evapora en el proceso de enfriamiento, los sólidos se concentran continuamente hasta alcanzar valores altos que potencialmente pueden generar taponamiento en sistemas, incremento de la actividad microbiana o corrosión en líneas y equipos usuarios en las plantas de proceso.

Las purgas pueden ejecutarse en la línea de retorno caliente, en equipos usuarios o en la misma piscina de la torre enfriadora, cada una de ellas con sus respectivos beneficios y riesgos.

Los ciclos de concentración requeridos para operar adecuadamente la torre enfriadora están en el rango entre $3 < CC < 5$; con valores bajos los ciclos se

incrementan los costos de operación y contrariamente con valores mayores en los ciclos de concentración se corre el riesgo de incrustaciones y taponamiento en sistemas usuarios.

1.6.2 Evaporación. La transferencia de masa ocurre normalmente desde la corriente de agua a la corriente de aire, en la operación de enfriamiento de agua, la rata de evaporación del agua es estable porque la rata de remoción de calor sensible desde el agua combinada con la baja evaporación puede ser estimada.

Se espera que aproximadamente la pérdida por evaporación sea en promedio máximo el 1% del flujo de agua que circula.

A medida que se disminuye la curva característica se incrementa el valor de L/G , no obstante si aumentamos el flujo de aire el valor de L/G disminuye. Podemos concluir, que el punto de intersección entre la curva característica y la curva de desempeño de la torre indica la relación L/G a la cual la torre debe operar; igualmente la gráfica nos demuestra que el coeficiente de rendimiento KaV/L varía al cambiar los valores de temperatura, especialmente con la temperatura de agua de entrada; los coeficientes disminuyen a medida que la temperatura del agua caliente se incrementa.

El diagnóstico tanto operativo como conceptual de una torre de enfriamiento involucra una serie de etapas que permiten establecer las relaciones de ingeniería, empíricas y metodológicas que definen el desarrollo del modelo operacional, los parámetros de diseño se basan conforme a los postulados del Cooling Tower Institute.

En este capítulo se explica el método desarrollado para el cálculo y simulaciones del comportamiento operacional de la torre enfriadora.

2.2 PROCEDIMIENTO EJECUTADO PARA LA RECOLECCIÓN DE LAS MUESTRAS

Los datos de operación de la torre de enfriamiento se realizan los días 15, 16 y 17 de junio del año 2015, fecha en la cual las celdas “D”; “E” y “H” estaban fuera de servicio; en los tres días en mención no se presentó lluvias.

La recopilación de datos fue ejecutada mediante hoja de datos y visita en campo, se realizaron acciones menores de mantenimiento para asegurar mediciones que no tienen instrumentación como: mediciones de presión a la llegada de las celdas, mediciones de temperatura en la salida de las celdas, medición de flujo con medidor portátil en el retorno de a cada una de las celdas.

La recopilación de datos tiene las siguientes características:

1. Se identifica las variables que deben ser tomadas en campo y la periodicidad de los análisis fueron ejecutados en tres días en horas diferentes; el resultado obtenido es el promedio de cada día para reducir el factor de error en la toma de datos.
2. Las tomas de amperaje de los ventiladores fueron tomadas por personal calificado con un amperímetro directamente en la casilla; las mediciones de amperaje de los motores de las bombas tienen medición en el tablero del área de generación de la planta eléctrica de la unidad de balance GRB.

3. Se verifica en programa corporativo PI Web (herramienta en línea que permite identificar el comportamiento de algunas variables); aunque se evidencia una debilidad en esta herramienta dado que la torre enfriadora tiene muy poca instrumentación en campo.

4. Los datos de los equipos eléctricos fueron tomados por personal calificado directamente en las casillas de las bombas de media tensión y en las casillas de los ventiladores de baja tensión.

2.3 INSTRUMENTACIÓN Y EQUIPOS

- Medidor de flujo tipo tubo Pitot para medir el flujo de agua circulante en el circuito de enfriamiento.
- Higrómetro: instrumento utilizado para medir las temperaturas y medir la humedad relativa del aire entrando y saliendo de la torre.
- Termómetro y termo pozo: utilizado para medir las temperaturas de entrada y salida en cada una de las celdas de la torre enfriadora.
- Manómetro: utilizado para medir las presiones en la descarga de las bombas y líneas de retorno a cada una de las celdas de la torre enfriadora.
- Medidor portátil por ultrasonido: utilizado para determinar el flujo de agua por el retorno de cada una de las celdas de la torre enfriadora.
- Para la medición de temperatura del agua de salida de cada celda fue necesario realizar inmersión de un sensor de temperatura en la piscina en el área asociada a cada celda en operación.

2.4 DATOS DE PARTIDA

Los datos consignados en los cuadros 1 y 2 son tomados del manual de operación de las torres enfriadoras de la unidad de balance³. Son la guía ideal para determinar si las condiciones operacionales de la torre enfriadora están operando dentro de los parámetros de diseño.

³ Fuente: HERNANDEZ Juan Carlos. Manual de operación de las torres enfriadoras de la unidad de Balance P. 7-59. ECOPEPETROL S.A. Barrancabermeja, 2005.

Cuadro 1. Datos de diseño de la torre enfriadora STE-2945.

DATOS DE LA TORRE ENFRIADORA STE-2945.			
Diseñador	TPL	L/G	0,94
Long (ft)	230,5	KaV/L	1,56
Ancho (ft)	110	Ka	176,1
Altura (ft)	54	Duty (MBTU/H)	1230,9
Área total del relleno (ft ²)	2025	Duty (MBTU/H) * CELDA	123,09
Altura del relleno (ft)	8	Diámetro de los conos (m)	9,23
Numero de celdas	10	Longitud de cada celda (ft)	45
Altura de la STE-2945 en msnm	100	Ancho de cada celda (ft)	45
Capacidad total de la piscina (Kgalones)	2.000	Altura de cada celda (ft)	54
DATOS DE AGUA.		DATOS DEL AIRE.	
Flujo de agua/celda (gpm)	7667	Temperatura de bulbo húmedo (°F)	82
Temperatura agua de retorno (°F)	120	Temperatura de Bulbo Seco (°F)	90
Temperatura de salida(°F)	90	flujo de aire/celda (kft ³ /m)	920,8
Flujo de Restitución gpm	1450 -1500		
Velocidad de agua/celda (ft/s)	7,83		

Fuente: Autor del proyecto.

Cuadro 2. Datos de los equipos de rotativos.

CARACTERÍSTICAS DE LOS MOTORES DE LAS BOMBAS.		DATOS DE LOS VENTILADORES.	
CARACTERÍSTICA	MP – 2945 A/B/E/F	Marca	HANSEN
Tipo de motor	Sincrónico	Diámetro(ft)	28
Potencia, Hp	850	Número de aspas	11
Velocidad, r.p.m.	900	Potencia BPH	215
Voltaje, volt	4160	Rotación RPM de las aspas	125
Fases	3	Angulo de aspas en grados	17°
Ciclos, Hz	60	Eficiencia	90%
CARACTERÍSTICAS DE LAS BOMBAS		Voltaje, V	440
CARACTERÍSTICA	MP – 2945 A/B/E/F	Amperaje, A	265
Marca	Nuovo Pignone	Velocidad, rpm del motor	1775
Presión de succión, psi	1	Frecuencia	60
Presión de descarga, psi	55	Fases	3
Cabeza diferencial, ft	128		
Capacidad de diseño, gpm	22		
Flujo mínimo continuo	6		
Potencia, BHP	Normal 856,máx.1000		
Velocidad, r.p.m.	900		

Fuente: Manual de operación de las torres enfriadoras de la unidad de Balance.

2.5 DATOS DE CAMPO

En el cuadro 3 están consignados los datos de campo obtenidos los días 15, 16 y 17 de junio del año 2015, fecha en la cual las celdas “D”; “E” y “H” estaban fuera de servicio, el valor de ángulo de inclinación de las aspas fueron tomados directamente de la herramienta corporativa para la gestión del mantenimiento en Ecopetrol “Ellipse”.

Existe limitación para la toma de datos en campo y para ejecutar tendencias que permitan diagnósticos rápidos y oportunos para mejorar la operación de la torre enfriadora, adicionalmente se deben realizar adecuaciones especiales para instalar los instrumentos requeridos para las mediciones de flujo y presión.

Cuadro 3. Datos de campo.

DATOS DE CAMPO.				
JUNIO 15 DE 2015.				
Celda	Flujo (gpm)	Vel (ft/s)	Aspas	Amp.
A	9.914	10,12	9,4	192
B	9.763	9,97	9,4	189
C	9.525	9,72	9,3	195
F	7.684	7,84	11,6	206
G	7.662	7,82	11,6	205
I	7.312	7,46	9,9	190
J	7.669	7,83	9,9	190
Total	59.528			
Promedios	8.504	8,68	10,16	195,29
JUNIO 16 DE 2015.				
Celda	Flujo (gpm)	Vel (ft/s)	Aspas	Amp.
A	9.794	10	9,4	193
B	9.645	9,85	9,4	188
C	9.409	9,61	9,3	197
F	7.591	7,75	11,6	208
G	7.570	7,73	11,6	204
I	7.368	7,52	9,9	189
J	7.594	7,75	9,9	190
Total	58.971			
Promedios	8424	8,6	10,16	195,57
JUNIO 17 DE 2015.				
Celda	Flujo (gpm)	Vel (ft/s)	Aspas	Amp.
A	10098	10,31	9,4	192
B	10188	10,4	9,4	188
C	9816	10,02	9,3	195
F	7484	7,64	11,6	208
G	7204	7,36	11,6	206
I	7102	7,25	9,9	188
J	8454	8,63	9,9	190
Total	60348			
Promedios	8621	8,8	10,16	195,29

Fuente: Autor del proyecto.

El cuadro 4 contiene el promedio de los datos obtenidos en campo que serán utilizados como parámetros en los cálculos de eficiencia para la torre enfriadora.

Cuadro 4. Datos promedios de campo.

PROMEDIOS POR CELDA.					
Celda	Flujo (gpm)	Vel (ft/s)	∓ Aspas	Amperaje	Presión Retorno (Psig)
A	9935,5	10,1	9,4	192,3	15,0
B	9865,3	10,1	9,4	188,3	15,0
C	9583,6	9,8	9,3	195,7	15,0
F	7586,4	7,7	11,6	207,3	14,5
G	7478,8	7,6	11,6	205,0	14,2
I	7260,8	7,4	9,9	189,0	14,0
J	7905,6	8,1	9,9	190,0	13,7
Total	59615,9				
Promedios	8516,6	8,7	10,3	195,4	14,49
Capacidad	111%				

Fuente: Autor del proyecto.

En los cuadros 5 y 6 están consignados los datos de campo obtenidos los días 15, 16 y 17 de junio del año 2015, fecha en la cual las celdas “D”; “E” y “H” estaban fuera de servicio. Los datos de temperatura son muy importantes para obtener los perfiles térmicos de la torre enfriadora y el desempeño de cada una de las celdas.

Cuadro 5. Temperaturas de retorno y salida del agua.

Celda	T. RETORNO (Thw) (°F)				T. SALIDA AGUA (Tcw) (°F)			
	Día 15	Día 16	Día 17	promedio	Día 15	Día 16	Día 17	Promedio
A	121,00	120,00	122,00	121,00	91	92	91	91,33
B	120,00	119,00	120,00	119,67	90	91	90	90,33
C	119,00	122,00	122,00	121,00	90	90	92	90,67
F	122,00	120,00	120,00	120,67	94	94	94	94,00
G	121,00	122,00	120,00	121,00	92	92	92	92,00
I	121,00	120,00	120,00	120,33	91	91	91	91,00
J	119,00	119,00	119,00	119,00	90	90	91	90,33
Promedio	120,43	120,29	120,43	120,38	91,14	91,43	91,57	91,38

Fuente: Autor del proyecto.

Cuadro 6. Temperaturas del aire de la STE-2945.

Celda	T. bulbo seco entrada (TBS1) (°F)				T. bulbo húmedo (Twb) (°F)				TEao
	Día 15	Día 16	Día17	promedio	Día 15	Día 16	Día17	promedio	
A	92,0	93,0	91,0	92,00	79,7	79,52	79,88	79,7	97,2
B	91,0	91,0	92,0	91,33	79,7	79,7	79,7	79,7	97,1
C	91,0	92,0	91,0	91,33	79,34	79,88	79,52	79,58	97,5
F	93,2	93,2	93,2	93,20	83,48	84,38	84,56	84,14	99,0
G	91,0	91,4	91,4	91,28	82,58	82,58	82,4	82,52	95,0
I	92,0	92,0	91,0	91,67	79,7	79,88	79,7	79,76	97,0
J	92,1	92,5	92,3	92,30	83,3	83,48	83,12	83,3	97,0
Promedio	91,77	92,15	91,70	91,87	81,11	81,35	81,27	81,24	97,11

Fuente: Autor del proyecto.

En el cuadro 7 está consignado el valor de las humedades relativas obtenidas en campo el día 15 de junio de 2015 a las 3:00 pm, con medidor portátil en el área de la pared exterior de la torre enfriadora a una altura de tres metros de la base de la piscina.

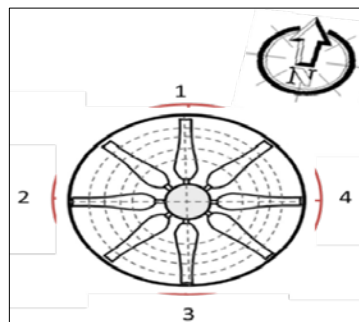
Cuadro 7. Humedad relativa STE-2945.

Celda.	Humedad relativa. (%)	
	Día 15	Promedio.
A	72,2	72,2
B	71	71
C	74	74
F	70.5	70.5
G	69.8	69.8
I	73	73
J	72	72
Promedio	72,44	72,44

Fuente: Autor del proyecto.

En la figura 7 y cuadro 8 se identifican los puntos del muestreo ejecutado el día 30 de junio de 2015; la variable monitoreada fue la velocidad de salida del aire saturado con medidores portátiles.

Figura 7. Puntos toma muestra de velocidades en cada celda.



Fuente: Autor del proyecto.

Cuadro 8. Toma de velocidades en cada celda.

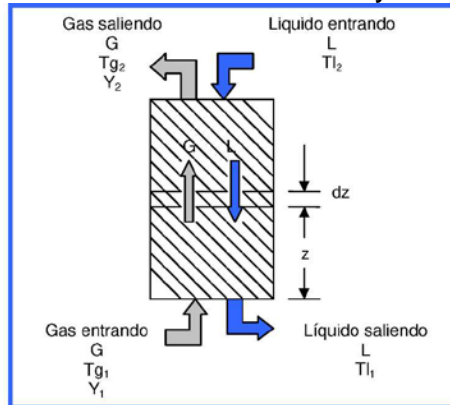
VELOCIDAD DEL AIRE EN CADA UNA DE LAS CELDAS (m/s)					
Celdas	1	2	3	4	Promedio
A	5,9	5,7	5,9	5,7	5,80
B	5,6	5,6	5,8	5,8	5,70
C	6	6	6,1	5,8	5,98
F	6,2	6,15	6,2	6,3	6,21
G	6,2	6,3	6,3	6,3	6,28
I	6	6,2	6,1	6,2	6,13
J	6,3	6,2	6	6,2	6,18
Promedios	6,029	6,021	6,057	6,043	6,04

Fuente: Autor del proyecto.

2.6 BALANCE DE ENERGÍA

La figura 8 simula la operación de la torre enfriadora y hace referencia al intercambio de energía entre el agua y el aire, al tamaño de la zona empacada y al cambio de las entalpías en el aire influenciado por la cesión de energía entregada por el agua de recirculación.

Figura 8. Balance de materia y energía.



Fuente: Autor del proyecto.

2.6.1 Balance global en la columna.

$$L_2 - L_1 = G' (Y_2 - Y_1)$$

2.6.2 Balance global de entalpía.

$$L_2 H_{L2} + G' H_1 + q = L_1 H_{L1} + G' H_2$$

Para el balance global de la entalpía:

Masa: $G' dY = dL$

Energía con $q = 0$ $G' dH = d^*(LH_L)$

Las magnitudes del calor específico C_s y el calor de vaporización del agua muestran que solamente una pequeña fracción del agua se evapora durante el enfriamiento.

En términos generales por cada 10 °F de enfriamiento la evaporación debe ser máximo 1% de agua, por tal razón la variación del $c_{p \text{ Líquido}}$ es pequeña.

$$d * (LH_L) = LC_{pL} dT_L \tag{1}$$

Dónde:

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

Integrando:

$$G' \int_{H_1}^{H_2} dH = \int_{T_{L1}}^{T_{L2}} LCp_L dT_L \quad (3)$$

$$G' * (H_2 - H_1) = LCp_L(T_{L2} - T_{L1}) \quad (4)$$

$$\frac{H_2 - H_1}{T_{L2} - T_{L1}} = \frac{LCp_L}{G'} \quad (5)$$

Para el cambio de la entalpía en la fase gaseosa la expresión en términos de temperatura se observa que tienen un fuerte impacto en la eficiencia de la torre enfriadora.

$$G'(dH) = G'd(c_s(T_G - T_O) + Y\lambda_0) = G'c_s dT_G + G'\lambda_0 \quad (6)$$

El calor sensible se transfiere a la masa de mezcla gas vapor a la velocidad así:

$$G'c_s dT_G = h_G a(T_i - T_G)SdZ \quad (7)$$

La transferencia de calor latente en la fase gaseosa:

$$G'\lambda_0 dY = \lambda_0 K_0 K_Y a (Y_i - Y)dZ \quad (8)$$

Sustituyendo las ecuaciones (7) y (8) en la ecuación (6) queda:

$$\frac{G'}{S} (dH) = G'h_G a(T_i - T_G)dZ + \lambda_0 K_Y(Y_i - Y)dZ \quad (9)$$

$$\frac{h_G a}{K_Y a} = r \quad (10)$$

r = Relación psicométrica.

Se debe suponer que las áreas de transferencia de calor y masa son iguales en las celdas de la torre enfriadora.

Entonces queda:

$$\frac{G'}{S} (dH) = K_Y a [c_s r(T_i + \lambda_0 Y) - (c_s r T_G + \lambda_0 Y)]dZ \quad (11)$$

Si la relación psicométrica (r) para los sistemas de agua y aire los comportamientos de las entalpías son:

$$H_i = c_s T_i + \lambda_0 Y_i \quad (12)$$

$$H_G = c_s T_G + \lambda_0 Y \quad (13)$$

La relación de las ecuaciones (12) y (13) en la ecuación (11) queda:

$$\frac{G'}{S} (dH) = K_Y a [H_i - H_G] dZ \quad (14)$$

Al integrarla queda:

$$\int_{H_1}^{H_2} \frac{G'}{S} \frac{dH}{K_Y a (H_i - H_G)} = \int_0^Z dZ = Z \quad (15)$$

Esta es la ecuación diseñada para la torre de enfriamiento, la integración se lleva a cabo usando valores de G' y $K_Y a$ promediados para la altura de la columna.

Se debe considerar la transferencia de calor sensible en el líquido; es decir desde el líquido hacia la interfase, se obtiene la ecuación inicial.

$$\frac{G'}{S} dH = \frac{d(LH_L)}{S} = \frac{L}{S} c_L dT_L \quad (16)$$

Relacionándola con la ecuación (14) queda:

$$\frac{L}{S} c_L dT_L = h_L a (T_L - T_i) dZ = K_Y a (H_i - H_G) dZ \quad (17)$$

Ordenándola queda:

$$\frac{h_L a}{K_Y a} = \frac{(H_i - H_G)}{(T_L - T_i)} \quad (18)$$

Las diferencias de entalpía indican la fuerza conductora y el área encerrada entre las dos líneas indica la energía total disponible en el sistema de agua y la película de aire saturada de vapor alrededor de la gota.

Las ecuaciones de trabajo para el presente proyecto son:

$$\frac{H_2 - H_1}{T_{L2} - T_{L1}} = \frac{L c_L}{G'} \quad (5)$$

$$\int_{H_1}^{H_2} \frac{G'}{S} \frac{dH}{K_Y a (H_i - H_G)} = \int_0^Z dZ = Z \quad (15)$$

$$\frac{h_L a}{K_Y a} = \frac{(H_i - H_G)}{(T_L - T_i)} \quad (18)$$

Existe una relación directa entre las entalpías de la fase gaseosa y las temperaturas.

2.6.3 Determinación del KaV/L .

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

Dónde:

C = Constante que depende de la relleno de la torre.

n = Dato que depende del diseñador y es aproximadamente (-0,6) adimensional. Para el caso de la torre enfriadora STE-2945.

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

Donde $y_1 =$ se evalúa y en $x = a + 0,1 (b - a)$

$Y_2 =$ se evalúa y en $x = a + 0,4 (b - a)$

$Y_3 =$ se evalúa y en $x = b - 0,4 (b - a)$

$Y_4 =$ se evalúa y en $x = b - 0,1 (b - a)$

Aplicando la fórmula de la torre característica.

$$\frac{KaV}{L} = \int_{T_{hw}}^{T_{cw}} \frac{dt}{E_{ao} - E_{wb}} = \frac{T_{hw} - T_{cw}}{4} * \left(\frac{1}{e_1} + \frac{1}{e_2} + \frac{1}{e_3} + \frac{1}{e_4} \right)$$

Donde $e_1 =$ evalúa $(E_{ao} - E_{wb})$ en $T_{cw} + 0,1 (T_{hw} - T_{cw})$

$E_2 =$ evalúa $(E_{ao} - E_{wb})$ en $T_{cw} + 0,4 (T_{hw} - T_{cw})$

$E_3 =$ evalúa $(E_{ao} - E_{wb})$ en $T_{hw} - 0,4 (T_{hw} - T_{cw})$

$E_4 =$ evalúa $(E_{ao} - E_{wb})$ en $T_{hw} - 0,1 (T_{hw} - T_{cw})$

La eficiencia de la torre es producto de la relación entre el L/G evaluado y el L/G de diseño.

2.6.4 Determinación del L/G.

$$\frac{H_2 - H_1}{T_{L2} - T_{L1}} = \frac{LcL}{G'} \quad (5)$$

$$L(T_{hw} - T_{cw}) = G(E_{ao} - E_{wb}) \quad (5,1)$$

$$\frac{L}{G} = \frac{(E_{ao} - E_{wb})}{(T_{hw} - T_{cw})} \quad (5,2)$$

2.7 BALANCE DE AGUA⁴.

La estabilidad del sistema depende de purgar parte del agua.

$$R + G_S Y_1 = P + A + G_S Y_2$$

$$R = P + A + G_S (Y_2 - Y_1)$$

$$E = G_S (Y_2 - Y_1)$$

$$R = P + A + E \tag{1}$$

Balance de solidos disueltos

$$R x_R = P x_p + A x_A + E x_E \tag{2}$$

Como los sólidos no se evaporan la relación queda:

$$R x_R = P x_p + A x_P \tag{3}$$

Relacionando (1) con (3) queda:

$$(P + A + E) x_R = P x_p + A x_P \tag{4}$$

$$(P x_R + A x_R + E x_R) = P x_p + A x_P \tag{5}$$

$$P (x_R - x_p) = -A (x_p - x_R) + E x_R \tag{6}$$

$$P = E \frac{x_R}{(x_p - x_R)} - A \tag{7}$$

$$P = E \frac{1}{\left(\frac{x_p}{x_R} - 1\right)} - A \tag{8}$$

Relacionando (1) con (8) queda:

$$R = E \frac{x_R}{(x_p - x_R)} - A + A + E \tag{9}$$

$$R = E \left(\frac{x_R}{(x_p - x_R)} + 1 \right) \tag{10}$$

$$R = E \frac{x_p}{(x_p - x_R)} \tag{11}$$

$$R = E \frac{\frac{x_p}{x_R}}{\left(\frac{x_p}{x_R} - 1\right)} \tag{12}$$

⁴ Fuente: QUIROGA Alejandro. Diseño de un sistema de agua de refrigeración en ciclo cerrado para una refinería de petróleo en Tarragona. España, 2012. Pág. 116 Trabajo de grado (Ingeniero Mecánico). Escuela Técnica Superior de Ingeniería. ICAI.

Los ciclos de concentración se definen como la relación que existe entre la concentración de la corriente de purga y la concentración de la corriente de reposición.

La relación queda:

$$CC = \frac{x_P}{x_R} \quad (13)$$

Relacionando las ecuaciones (12) y (13) queda:

$$P = E \frac{1}{(CC-1)} - A \quad (14)$$

$$R = E \frac{CC}{(CC-1)} \quad (15)$$

2.8 CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA

2.8.1 Consumo energético de los Ventiladores de tiro inducido. Los ventiladores son parte importante en la eficiencia de las torres enfriadoras, la operación efectiva de los ventiladores puede verse influenciada por varios factores tanto estructurales como dinámicos, los ventiladores de la STE-2945 son de flujo axial con paletas en fibra de vidrio moldeadas a la forma del cono.

Un criterio muy importante para el diseño de las palas es proporcionar un flujo de aire lo más uniforme posible, los ventiladores están provistos de 11 paletas con diámetro de 28 ft y la velocidad de rotación es de 125 rpm.

El incremento en la holgura entre la pala del ventilador y la carcasa del cono (área de sello) resulta en la reducción del rendimiento del ventilador; debido a la fuga del aire impulsada desde la zona de mayor presión a la zona de las puntas de las paletas de menor presión, para evitar las pérdidas el fabricante recomienda diámetros entre la punta de la paleta y la carcasa del cono entre 0,5 y 1,0 % del diámetro del ventilador, sin embargo en la norma API-661 recomienda manejar la holgura radial en 0,5% en conclusión máximo 0,14 ft de holgura.

$$\text{Pérdidas por holgura} = 2 \left(\frac{\text{holgura}}{\text{longitud de la paleta}} - 0,01 \right)$$

En conclusión a medida que incrementamos la holgura entre paleta y carcasa del cono se incrementa las pérdidas.

Determinación de la densidad del aire en el área de cada celda.

$$\rho = \frac{P * Ma}{Z * R * T} * \left[1 - X_v * \left(1 - \frac{M_v}{Ma} \right) \right]$$

$$\text{celda A; } \rho = \frac{101118 * 0,0289635}{1 * 8,31451 * 273,15 + \left(\frac{92 - 32}{1,8}\right)} * \left[1 - 0,01 * \left(1 - \frac{0,0180154}{0,0289635}\right)\right]$$

$$\text{Area celda A; } \rho = 1,1450 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

2.8.2 Potencia requerida por los ventiladores de tiro inducido.

Cada uno de los ventiladores de la torre enfriadora tiene una potencia por diseño de 226 caballos de fuerza, de acuerdo a lo anterior se desarrolla el cálculo de potencia de acuerdo a la siguiente formula:

$$\text{Potencia (HP)} = \frac{(\sqrt{3} * \text{amp} * \text{voltaje} * \text{factor de potencia} * \text{eficiencia})}{746}$$

Adicionalmente para determinar el consumo de energía en Kw-h se realiza utilizando la siguiente formula.

$$\text{Consumo (Kw - h)} = \frac{(\sqrt{3} * \text{amp} * \text{voltaje} * \text{factor de potencia} * \text{eficiencia})}{1000}$$

2.8.3 Bombas centrifugas. El sistema cuenta con seis bombas centrifugas, de las cuales cuatro son accionadas con motor eléctrico sincrónico, las dos bombas accionadas por turbina se encontraban fuera de servicio para el periodo de la recolección de la información de campo; los motores tienen una capacidad por diseño de operar a una potencia de máximo 1 Mw-h.

2.9 ZONA EMPACADA

Es el área donde una mayor cantidad del área del agua es expuesta a la corriente del aire, incrementando la cantidad de calor transmitido; igualmente se favorece el tiempo de contacto aire – agua.

Estos empaques dividen al flujo de agua en finas partículas exponiendo máxima superficie de líquido sin que se forme barreras que impidan el flujo en contra corriente del aire, con la utilización de esta técnica, la velocidad del aire y el volumen del líquido pueden ser incrementados sin afectar negativamente la transferencia de calor; adicionalmente la zona empacada es una zona muy fuerte, resistente al impacto, a la erosión y bajo nivel de resistencia al flujo de aire.

Características más importantes de los rellenos:

- a. Máxima superficie de contacto y alta resistencia a la temperatura.

- b. Alta resistencia a la corrosión.
- c. Alta resistencia al ataque biológico.
- d. Evitar canalizaciones de los flujos.
- e. Afectación por variaciones de presión y temperatura.

2.10 ELIMINADORES DE GOTAS

La niebla creada a la salida del empaquetamiento está compuesta principalmente por aire saturado donde circulan minúsculas gotas de agua que contienen especies químicas y/o microbianas, estas gotas deben ser recuperadas para reducir la contaminación y las pérdidas de agua, cuando la gota choca con el eliminador sufre cambios bruscos de dirección y se aglomera con otras gotas ganando peso para caer nuevamente a la piscina.

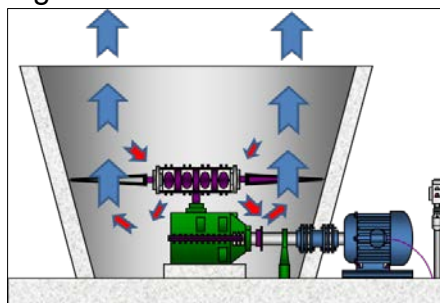
Como máximo por diseño los eliminadores deben atrapar alrededor del 0,01% del flujo de agua que circula en la torre enfriadora y entre mayor sea la velocidad que maneja el aire de cada celda menor será la capacidad de recuperación de agua en el eliminador.

Los eliminadores de gotas deben ofrecer mínima resistencia al flujo de aire y alta retención de humedad al aire que sale.

2.11 RECIRCULACIÓN DE AIRE

En la figura 9 se recrea el fenómeno se produce porque la caída de presión causada por la velocidad de aire en la estructura de la torre; entre mayor sea la caída de presión mayor será la recirculación, al mismo tiempo los fenómenos meteorológicos como la lluvia incrementan el fenómeno de recirculación con un incremento de aire.

Figura 9. Recirculación de aire.



Fuente: Autor del proyecto.

La recirculación máxima de aire permitida para no afectar la eficiencia y mantener las condiciones operacionales de la torre de enfriamiento se define como:

$$\%Recirculacion = \frac{E_{wb} - E_a}{E_{ao} - E_a} * 100$$

La recirculación de aire en una torre de enfriamiento está definida por la variación de la atmosfera entrando a la torre por la saturación del aire por encima de la temperatura ambiente, reduciendo el rendimiento global de la torre; la recirculación es un complejo resultado de factores que afectan la presión negativa y la de aire requerido para la dilución.

La relación de las entalpías no debe ser superior al 3% para garantizar que la mayor proporción de masa del aire sea aprovechada en el proceso de enfriamiento.

Para determinar la Tea se debe asumir 0,5 °F menos que el valor obtenido en la temperatura de bulbo húmedo.

2.12 BALANCE ECONÓMICO

El balance económico tiene como premisa determinar en tiempo presente los valores históricos de costos en las torres enfriadoras y desarrollar propuestas de reducción de costos para el año 2016.

2.12.1 Histórico de costos operacionales en dinero presente de la STE-2945.

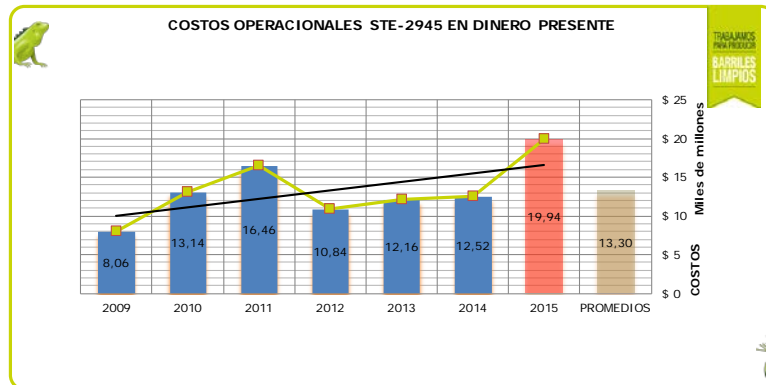
En el cuadro 9 y en la figura 10 se observa un El incremento de 37,19% en el costo de operación del año 2015 con relación al año 2014, están asociados a los sobre costos en energía eléctrica por la operación de una bomba adicional con un 12,07% y a los altos flujos en el agua de restitución que se incrementaron en un 17,63% con respecto al año 2014.

Cuadro 9. Histórico de costos operacionales en dinero presente de la STE-2945.

AÑO	COSTOS TOTALES	COSTOS ASOCIADOS A ENERGIA
2009	\$ 8.061.650.782	\$ 4.030.825.391
2010	\$ 13.139.200.543	\$ 6.569.600.272
2011	\$ 16.463.670.406	\$ 8.231.835.203
2012	\$ 10.841.102.279	\$ 5.420.551.139
2013	\$ 12.159.601.903	\$ 6.079.800.952
2014	\$ 12.523.139.997	\$ 6.261.569.999
2015	\$ 19.939.438.040	\$ 9.984.556.800

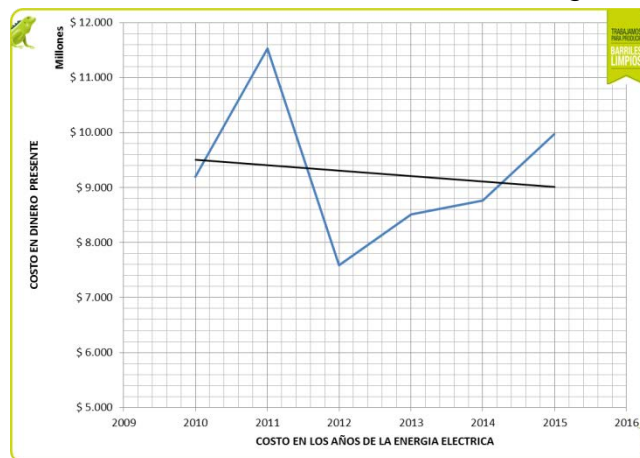
Fuente: Autor del proyecto.

Figura 10. Histórico de costos operacionales en dinero presente de la STE-2945.



Fuente: Autor del proyecto.

Figura 11. Tendencia de los costos de la energía eléctrica.

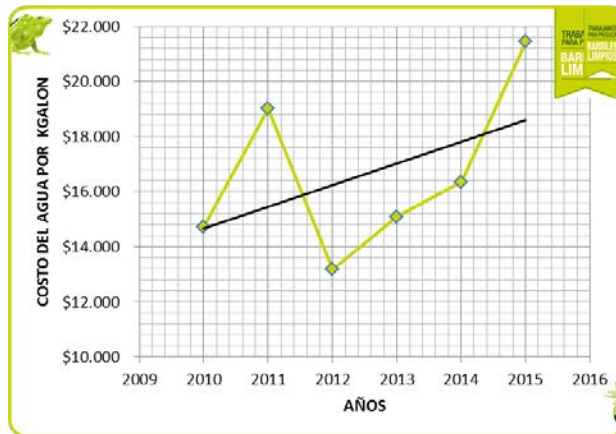


Fuente: Autor del proyecto.

La figura 11 muestra el comportamiento que presentan los costos operacionales de la torre enfriadora por consumo de energía eléctrica y se evidencia incrementos continuos desde el año 2010 con un porcentaje del 5,47%, adicionalmente el sobre costo presentado en el año 2011 se debió principalmente a compras de energía del anillo nacional por la reducción de los tiempos medios entre fallas en los generadores de la unidad de Balance.

Los costos operacionales tienen como variable de medición principal el Kgalón de agua tratada referenciado en la figura 12; los costos del agua de enfriamiento en el año 2011 se afectaron el incremento en los consumos de agua de restitución, los mantenimientos no programados por falla en equipos rotativos y un costo adicional exógeno fue el cargue de la depreciación al costo total de la torre enfriadora.

Figura 12. Tendencia de los costos del kilo-galón de agua de enfriamiento.

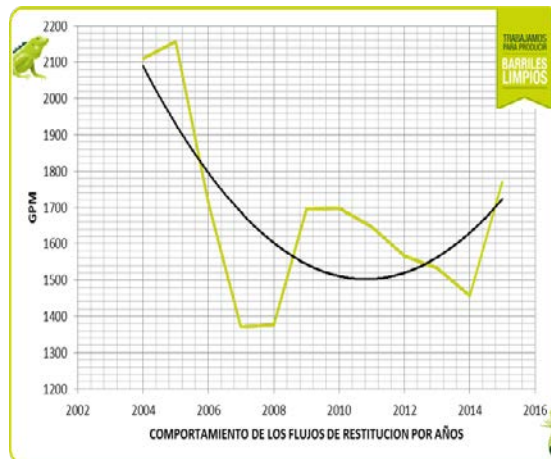


Fuente: Autor del proyecto.

Con la aplicación de las recomendaciones del presente documento se proyectan los siguientes ahorros en el costo del kgalón de agua de enfriamiento, con un potencial de ahorro ejecutando cambios en el modelo operacional en 14,82%.

En la figura 13 se evidencia el incremento en el consumo de agua de restitución de la torre desde el año 2008, muy posiblemente fue por fallas en la medición debido principalmente a que el atrapa neblina de las celdas A-B-C-D presentaban daños catastróficos y fue necesario intervenirlos y cambiar la zona empacada completamente.

Figura 13. Tendencia de los flujos de agua de restitución por año.



Fuente: Autor del proyecto.

2.12.2 Situación actual de la torre enfriadora STE-2945.

En el cuadro 10 se establecen las condiciones actuales de la torre enfriadora operando con siete ventiladores de tiro inducido y 4 bombas centrífugas con una capacidad cada una de 23000 gpm; los costos de este esquema de operación es de \$9.984.556.800 pesos al año asociados a los costos de energía eléctrica.

Cuadro 10. Situación actual de la torre enfriadora STE-2945.

SITUACION ACTUAL STE-2945.	
Costo energético por operación de cada ventilador (kw/h)	\$ 49.660
Costo energético por operación de los ventiladores (7) (kw/h)	\$ 347.620
Costo energético de operación de cada bomba (kw/h)	\$ 202.000
Costo energético de operación de las bomba (4) (kw/h)	\$ 808.000
costo operacional por año de los ventiladores (7)	\$ 3.003.436.800
Costo operacional por año de las bombas (4)	\$ 6.981.120.000
Costo energético operación de la torre enfriadora	\$ 9.984.556.800

Fuente: Autor del proyecto.

2.12.3 Propuestas económicas STE-2945.

En el cuadro 11 se establecen las condiciones propuestas para la reducción de costos operacionales en la torre enfriadora y consiste básicamente en sacar de servicio una bomba; específicamente la SP-2945 E; porque opera a baja eficiencia por debajo de la curva de operación.

Con esta acción se logra que la presión de retorno a cada celda bajen de 14 psig a 12 psig de acuerdo al diseño de la torre; adicionalmente se debe poner en servicio un ventilador para incrementar la distribución de agua en cada una de las celdas y mejorar el L/G y consecencialmente la aproximación.

Cuadro 11. Propuesta económica STE-2945.

PROPUESTA STE-2945.	
Costo energético por operación de cada ventilador (kw/h)	\$ 49.660
Costo energético por operación de los ventiladores (8) (kw/h)	\$ 397.280
Costo energético de operación de cada bomba (kw/h)	\$ 202.000
Costo energético de operación de las bomba (3) (kw/h)	\$ 606.000
costo operacional por año de los ventiladores (8)	\$ 3.432.499.200
Costo operacional por año de las bombas (3)	\$ 5.235.840.000
costo anual consumo de energía entre bombas y ventiladores	\$ 8.668.339.200

Fuente: Autor del proyecto.

Como consecuencia se lograra mejorar la distribución del agua, mejorar la velocidad del agua y evitar sobre presión en líneas y equipos usuarios.

En el cuadro 12 se plantean los ahorros económicos producto de la optimización y racionalización del consumo de energía eléctrica, se propone operar con tres bombas centrífugas y 8 ventiladores de tiro inducido el ahorro proyectado es de \$ 1.316.217.600 pesos calculado en dinero presente.

Cuadro 12. Consolidado de costos energéticos STE-2945.

CONSOLIDADO DE COSTOS ENERGETICOS STE-2945	
Costos 2015 en energía	\$ 9.984.556.800
Costos propuestos en energía para el 2016.	\$ 8.668.339.200
Ahorro propuesto en energía.	\$ 1.316.217.600

Fuente: Autor del proyecto.

Adicionalmente en el cuadro 13 se establece como propuesta adicional reducción en el consumo de agua partiendo del cálculo de restitución de agua para la torre es de 1118 gpm; sin embargo se presupuesta un 20% para contingencias y planes especiales de purga, razón por la cual el balance económico se realiza con 1341 gpm, el ahorro en el consumo de agua está proyectado con la utilización de la purga continua para eliminar concentración de especies químicas y no para el control térmico de la torre.

Cuadro 13. Proyección de costos 2016.

PROYECCIÓN DE COSTOS 2016.			
Ítem	Costo total	Ahorro en \$	Ahorro en %
A	Sin ajustes en la operación.	\$ 21.863.593.811	0
B	Con ajustes operacionales ahorrando energía.	\$ 18.623.220.440	14,82%
	Sin ajustes en restitución de agua (1769 gpm).		
C	Con ajustes operacionales ahorrando energía.	\$ 15.115.197.641	30,87%
	Ajustando restitución de agua a (1341 gpm).		
	Ahorro potencial.	\$ 6.748.396.170	

Fuente: Autor del proyecto.

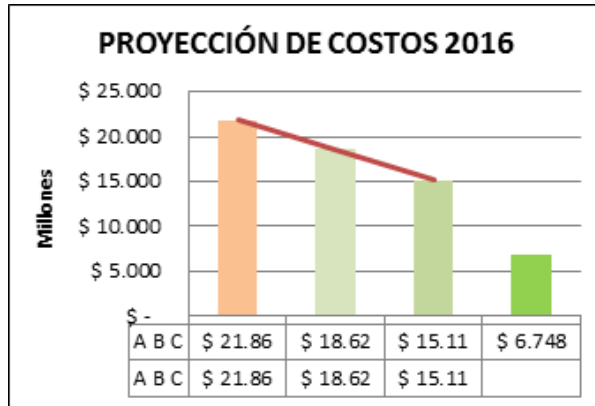
En la figura 14 se establecen los ahorros proyectados para el año 2016 si logramos instalar operacionalmente las siguientes acciones de mejora:

A. El potencial de incremento de los costos si no se hacen ajustes es del 9,65% de acuerdo al comportamiento de los históricos desde el año 2010, proyectando los costos totales en \$ 21.863.593.811 pesos para el año 2016.

B. El potencial de ahorro del 14,82% está desarrollado únicamente con ajustes en la operación de ventiladores de tiro inducido y bombas centrífugas, proyectando los costos totales en \$ 18.623.220.440 pesos para el año 2016.

C. El potencial de ahorro del 30,87% se logra si adicionalmente se reduce el consumo de agua de 1769 gpm a 1341 gpm, proyectando los costos totales en \$ 15.115.197.641 pesos para el año 2016.

Figura 14. Proyección de costos 2016.



Fuente: Autor del proyecto.

Ejecutando las recomendaciones de corto plazo para mejorar las condiciones operacionales de la torre enfriadora se obtiene un ahorro potencial de \$6.748.396.170 pesos para el año 2016.

En la figura 15 se verifica la proyección en el consumo y ahorro del agua de restitución impactando positivamente el proceso de clarificación donde se dejaría de tratar 427 gpm de agua que equivale a 221.595.333 galones al año; los costos de tratamiento es de \$4289 pesos por kilo galón tratado, en términos generales el ahorro es de \$ 950.430.360 pesos para el año 2016.

Figura 15. Restitución de agua proyectada para el año 2016.



Fuente: Autor del proyecto.

2.13 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS

El análisis estadístico se centra en el uso de datos estadísticos descriptivos. Cuando se describe un conjunto de variables se trata de sintetizar sus características en unos índices numéricos que representen adecuadamente a ese

conjunto de características. En este texto, básicamente las técnicas que se expondrán serán las medidas de tendencia central, valores percentiles, dispersión y distribución.

2.13.1 Base de datos.

Cuadro 14. Base de datos análisis estadístico de datos 1.

CELDA	Flujo gpm	Vel(ft/s) (agua)	Presión de retorno	° ϕ Aspas	Amp	Thw	(TBS1)	Humedad relativa	Twb	Tcw	TEao	Eao
A	9935,5	10,1	15,0	9,4	192,3	121,0	92,0	72,2	79,7	91,3	97,2	66,9
B	9865,3	10,1	15,0	9,4	188,3	119,7	91,3	71,0	79,7	90,3	97,1	66,7
C	9583,6	9,8	15,0	9,3	195,7	121,0	91,3	74,0	79,6	90,7	97,5	67,4
F	7586,4	7,7	14,5	11,6	207,3	120,7	93,2	70,5	84,1	94,0	99,0	70,0
G	7478,8	7,6	14,2	11,6	205,0	121,0	91,3	69,8	82,5	92,0	95,0	63,3
I	7260,8	7,4	14,0	9,9	189,0	120,3	91,7	73,0	79,8	91,0	97,0	66,6
J	7905,6	8,1	13,7	9,9	190,0	119,0	92,3	72,0	83,3	90,3	97,0	66,6

Fuente: Autor del proyecto.

Cuadro 15. Base de datos análisis estadístico de datos 2.

CELDA	Real (Kw)	Velocidad (M/S) (aire)	Flujo másico (Kg/s)	L/G	Ewb	KaV/L	Tower eficiencia	Aproximación	L/V	Ka	% Recirculación
A	122,2	5,8	379,7	0,8	43,4	1,2	0,8	11,6	0,792	0,927	2,20%
B	119,7	5,7	373,6	0,8	43,4	1,2	0,8	10,6	0,796	0,968	2,22%
C	124,3	6,0	391,6	0,8	43,3	1,2	0,8	11,1	0,795	0,950	2,31%
F	131,7	6,2	405,8	0,8	48,4	1,1	0,9	9,9	0,809	0,869	2,80%
G	130,3	6,3	411,3	0,6	46,5	1,1	0,6	9,5	0,581	0,651	3,10%
I	120,1	6,1	401,2	0,8	43,5	1,2	0,8	11,2	0,787	0,906	2,41%
J	120,7	6,2	404,0	0,7	47,4	1,4	0,7	7,0	0,668	0,948	2,94%

Fuente: Autor del proyecto.

2.13.2 Coeficiente de correlación. El grado de asociación entre dos variables numéricas puede ser resumido en un estadístico; la correlación indica una situación de los mismos sucesos respecto a dos variables expresando el grado en que se relacionan.

En el cuadro 16 se presentan las correlaciones positivas altas entre las variables mayores al 70%.

Cuadro 16. Porcentajes de correlación.

PORCENTAJES DE CORRELACION	
	Correlación >70%
	Correlación >80%
	Correlación >90%
	Correlación = 100%

Fuente: Autor del proyecto.

Cuadro 17. Coeficiente de correlación.

	° Δ Aspas	Amp	(TBS1)	Twb	Tcw	TEao	Eao	Real (KW)	Velocidad (M/S) (aire)	Flujo másico (Kg/s)	L/G	Ewb	Tower eficiencia	L/V	Ka	% Recirculación
° Aspas	1,000															
Amp	0,864	1,000														
(TBS1)	0,415	0,380	1,000													
Twb	0,797	0,646	0,692	1,000												
Tcw	0,809	0,868	0,677	0,621	1,000											
TEao	-0,102	0,064	0,721	0,139	0,388	1,000										
Eao	-0,081	0,085	0,729	0,154	0,407	1,000	1,000									
Real (KW)	0,864	1,000	0,380	0,646	0,868	0,064	0,085	1,000								
Velocidad (M/S) (aire)	0,785	0,602	0,346	0,744	0,491	-0,155	-0,141	0,602	1,000							
Flujo másico (Kg/s)	0,779	0,595	0,314	0,728	0,473	-0,183	-0,169	0,595	0,999	1,000						
L/G	-0,489	-0,284	0,249	-0,459	0,055	0,803	0,795	-0,284	-0,577	-0,593	1,000					
Ewb	0,794	0,646	0,702	1,000	0,627	0,155	0,171	0,646	0,743	0,726	-0,443	1,000				
Tower eficiencia	-0,489	-0,284	0,249	-0,459	0,055	0,803	0,795	-0,284	-0,577	-0,593	1,000	-0,443	1,000			
L/V	-0,489	-0,284	0,249	-0,459	0,055	0,803	0,795	-0,284	-0,577	-0,593	1,000	-0,443	1,000	1,000		
Ka	-0,798	-0,704	0,142	-0,416	-0,464	0,626	0,610	-0,704	-0,623	-0,636	0,743	-0,405	0,743	0,743	1,000	
% Recirculación	0,814	0,600	0,294	0,872	0,405	-0,329	-0,314	0,600	0,872	0,872	-0,806	0,865	-0,806	-0,806	-0,698	1,00

Fuente: Autor del proyecto.

Cuadro 18. Análisis estadístico de la eficiencia de la torre enfriadora 1.

	Flujo Gpm	vel= ft/s (agua)	Presión retorno	° Δ Aspas	Amp	Thw	(TBS1)	Humedad relativa
Media	8516,56	8,70	14,49	10,16	195,38	120,38	91,87	71,79
Error típico	459,38	0,47	0,20	0,38	2,94	0,29	0,26	0,55
Mediana	7905,60	8,07	14,50	9,95	192,33	120,67	91,67	72,00
Moda			15,00			121,00	91,33	
Desviación Estándar	1215,40	1,24	0,54	1,02	7,79	0,78	0,70	1,46
Varianza de la muestra	1477204,82	1,54	0,29	1,03	60,68	0,61	0,49	2,13
Curtosis	-2,58	-2,58	-1,73	-1,11	-1,09	0,08	1,28	-0,80
Coefficiente de asimetría	0,31	0,31	-0,32	0,94	0,89	-1,11	1,28	0,17
Rango	2674,67	2,73	1,30	2,33	19,00	2,00	1,92	4,20
Mínimo	7260,80	7,41	13,70	9,28	188,33	119,00	91,28	69,80
Máximo	9935,47	10,14	15,00	11,61	207,33	121,00	93,20	74,00
Cuenta	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00
Nivel de Confianza (95,0%)	1124,06	1,15	0,50	0,94	7,20	0,72	0,65	1,35

Fuente: Autor del proyecto.

El análisis estadístico de los datos arroja los siguientes resultados en el cuadro 18 se observa que el ángulo de inclinación de las aspas de los ventiladores está asociado directamente a la potencia.

El porcentaje de recirculación de aire dentro del cono del ventilador impacta sobre la potencia del ventilador y sobre la energía retirada de la celda.

La relación de las entalpías afecta notablemente la eficiencia de la torre enfriadora.

Cuadro 19. Análisis estadístico de la eficiencia de la torre enfriadora 2.

	Twb	Tcw	TEao	Eao	Real (KW)	Velocidad (M/S) (aire)	Flujo másico (Kg/s)	L/G
Media	81,24	91,38	97,11	66,77	124,15	6,04	395,33	0,75
Error típico	0,76	0,49	0,44	0,73	1,87	0,08	5,36	0,03
Mediana	79,76	91,00	97,10	66,72	122,22	6,13	401,21	0,79
Moda	79,70	90,33	97,00	66,55				
Desviación Estándar	2,00	1,30	1,17	1,94	4,95	0,22	14,18	0,09
Varianza de la muestra	4,00	1,68	1,37	3,76	24,50	0,05	201,08	0,01
Curtosis	-2,05	2,82	2,74	2,69	-1,09	-1,20	-1,16	1,19
Coefficiente de asimetría	0,58	1,66	-0,39	-0,26	0,89	-0,67	-0,66	-1,54
Rango	4,56	3,67	4,00	6,64	12,07	0,58	37,73	0,23
Mínimo	79,58	90,33	95,00	63,32	119,68	5,70	373,60	0,58
Máximo	84,14	94,00	99,00	69,96	131,75	6,28	411,33	0,81
Cuenta	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00
Nivel de Confianza (95,0%)	1,85	1,20	1,08	1,79	4,58	0,20	13,11	0,08

Fuente: Autor del proyecto.

Cuadro 20. Análisis estadístico de la eficiencia de la torre enfriadora 3.

	Ewb	KaV/L	Tower eficiencia	Aproximación	L/V	Ka	% Recirculación
Media	45,10	1,19	0,79	10,14	0,75	0,89	0,025684
Error típico	0,85	0,04	0,04	0,59	0,03	0,04	0,001399
Mediana	43,47	1,17	0,84	10,63	0,79	0,93	0,024101
Desviación Estándar	2,24	0,11	0,09	1,57	0,09	0,11	0,003700
Varianza de la muestra	5,00	0,01	0,01	2,46	0,01	0,01	0,000014
Curtosis	-1,94	3,59	1,19	2,36	1,19	5,05	-1,893832
Coefficiente de asimetría	0,61	1,66	-1,54	-1,49	-1,54	-2,19	0,474691
Rango	5,14	0,34	0,24	4,60	0,23	0,32	0,008988
Mínimo	43,26	1,07	0,62	7,03	0,58	0,65	0,022047
Máximo	48,40	1,42	0,86	11,63	0,81	0,97	0,031034
Cuenta	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,000
Nivel de Confianza (95,0%)	2,07	0,10	0,09	1,45	0,08	0,10	0,003422

Fuente: Autor del proyecto.

El rango verificado para el flujo de agua de recirculación, el flujo de aire y el amperaje de los motores de los ventiladores es alto, entre mayor rango mayor variabilidad de datos, esto concluye que existe una acentuada variación operacional entre las celdas de la torre enfriadora para las variables de flujo de agua y potencia de los ventiladores de tiro inducido.

La desviación estándar hallada para los flujos de agua de recirculación y el flujo de aire tiene alta variabilidad indicando que existe una diferencia considerable entre los caudales de cada una de las celdas.

Las curtosis de cada una de las variables son bajas y algunas negativas, lo que indica muy baja variación entre los resultados y que no hay diferencia considerable entre las variables; en un histograma la línea tendería a ser recta.

Los coeficientes de asimetría negativos nos indican que gran parte los datos obtenidos en campo son altos con respecto a la media.

La desviación estándar para el flujo de agua de recirculación entrando a cada celda indica que existe mucha variación en el flujo de agua a cada celda “desbalance hidráulico”

2.13.3 Regresión. El análisis de regresión consiste en emplear métodos que permite determinar la mejor relación funcional entre dos o más variables relacionadas.

En el cuadro 21 están los datos tomados en campo y se identificó que la variable con mayor dependencia es la temperatura de salida del agua de la torre enfriadora y es posible relacionarla con la temperatura de entrada a la torre, la temperatura de bulbo húmedo y seco, la humedad relativa y la temperatura de salida de aire del cono de la torre.

Cuadro 21. Datos requeridos para el análisis de regresión.

Tcw	Thw	(TBS1)	Humedad relativa	Twb	TEao
91,33	121,00	92,00	72,20	79,70	97,20
90,33	119,67	91,33	71,00	79,70	97,10
90,67	121,00	91,33	74,00	79,58	97,50
94,00	120,67	93,20	70,50	84,14	99,00
92,00	121,00	91,28	69,80	82,52	95,00
91,00	120,33	91,67	73,00	79,76	97,00
90,33	119,00	92,30	72,00	83,30	97,00

Fuente: Autor del proyecto.

Resultados:

Cuadro 22. Regresión estadística.

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0,999990
Coefficiente de determinación R ²	0,999979
R ² ajustado	0,499937
Error típico	0,781670
Observaciones	7

Fuente: Autor del proyecto.

Cuadro 23. Análisis de varianza.

ANÁLISIS DE VARIANZA				
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	Valor crítico de F
Regresión	5	58462,22243	11692,4445	0,0054882
Residuos	2	1,222014444	0,61100722	
Total	7	58463,44444		

Fuente: Autor del proyecto.

Cuadro 24. Coeficientes análisis de varianza.

	Coeficientes	Error Típico	Estadístico T	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Thw	0,6830	0,3221	2,1203	-0,7030	2,0690	-0,7030	2,0690
(TBS1)	-0,4178	1,0849	-0,3851	-5,0856	4,2499	-5,0856	4,2499
Humedad relativa	-0,4740	0,2845	-1,6660	-1,6980	0,7501	-1,6980	0,7501
Twb	0,2708	0,3482	0,7778	-1,2274	1,7691	-1,2274	1,7691
TEao	0,6134	0,5403	1,1351	-1,7116	2,9383	-1,7116	2,9383

Fuente: Autor del proyecto.

Cuadro 25. Análisis de los residuales.

Análisis de los residuales				Resultados de datos de probabilidad	
Observación	Pronóstico Tcw	Residuos	Residuos estándares	Percentil	Tcw
1	91,1904	0,1429	0,3420	7,1429	90,3
2	91,0657	-0,7324	-1,7529	21,4286	90,3
3	90,7673	-0,1007	-0,2410	35,7143	90,7
4	93,5737	0,4263	1,0202	50,0000	91,0
5	92,0432	-0,0432	-0,1033	64,2857	91,3
6	90,3888	0,6112	1,4629	78,5714	92,0
7	90,6462	-0,3129	-0,7488	92,8571	94,0

Fuente: Autor del proyecto.

La figura 16 indica que las muestras obtenidos para la temperatura de salida de agua difiere mucho entre datos de salida de cada una de las celdas de la torre enfriadora, por tal razón las celdas A; B y C tienen alta relación en los resultados. Las celdas F; G; I y J tienen comportamientos totalmente diferentes a los esperados debido a que no fueron repotenciados.

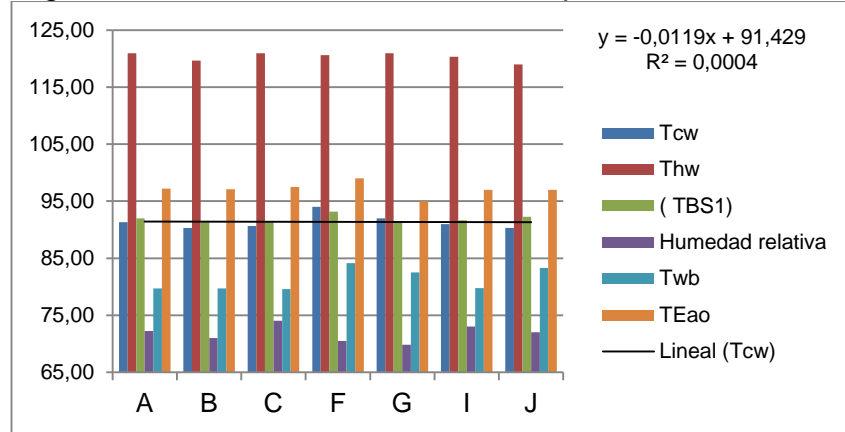
El grado de correlación entre las variables indica una fuerte relación del 99%.

El análisis indica que la temperatura de salida del agua depende casi exclusivamente del comportamiento de las variables correlacionadas.

Los residuos hallados son muy pequeños por tal razón los pronósticos sobre la relación entre las variables es más objetivo.

El valor crítico de F también es un número muy bajo indicando mayor relación entre los datos obtenidos.

Figura 16. Análisis estadístico del comportamiento térmico.



Fuente: Autor del proyecto.

Igualmente en el cuadro 26 de acuerdo a las simulaciones realizadas el LG es un valor dependiente dentro de las variables relacionadas (KaV/L; tower eficiencia; L/V, Ka, % recirculación) por tal razón se verifica su correlación.

Cuadro 26. Análisis estadísticos de los coeficientes de transferencia

L/G	KaV/L	Tower eficiencia	L/V	Ka	% Recirculación
0,79	1,17	0,84	0,79	0,93	0,02
0,80	1,22	0,85	0,80	0,97	0,02
0,80	1,19	0,85	0,80	0,95	0,02
0,81	1,07	0,86	0,81	0,87	0,03
0,58	1,12	0,62	0,58	0,65	0,03
0,79	1,15	0,84	0,79	0,91	0,02
0,67	1,42	0,71	0,67	0,95	0,03

Fuente: Autor del proyecto.

Cuadro 27. Estadísticas de regresión de los coeficientes de transferencia.

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	1
Coefficiente de determinación R ²	1
R ² ajustado	0,33333333
Error típico	1,2433E-16
Observaciones	7

Fuente: Autor del proyecto.

Cuadro 28. Análisis de varianza de los coeficientes de transferencia.

ANÁLISIS DE VARIANZA					
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	5	3,951953677	0,790390735	6,39141E+31	9,49654E-17
Residuos	3	4,63742E-32	1,54581E-32		
Total	8	3,951953677			

Fuente: Autor del proyecto.

Cuadro 29. Análisis de residuales de los coeficientes de transferencia.

Análisis de los residuales				Resultados de datos de probabilidad	
Observación	Pronóstico L/G	Residuos	Residuos estándares	Percentil	L/G
1	0,7925	-3,33067E-16	-1,2377	7,1429	0,5814
2	0,7960	-4,44089E-16	-1,6503	21,4286	0,6684
3	0,7955	-3,33067E-16	-1,2377	35,7143	0,7868
4	0,8085	-2,22045E-16	-0,8251	50,0000	0,7925
Observación	Pronóstico L/G	Residuos	Residuos estándares	Percentil	L/G
5	0,5814	-2,22045E-16	-0,8251	64,2857	0,7955
6	0,7868	-2,22045E-16	-0,8251	78,5714	0,7960
7	0,6684	-1,11022E-16	-0,4126	92,8571	0,8085

Fuente: Autor del proyecto.

Las variables (L/G; KaV/L; tower eficiencia y el % de recirculación) muestran una fuerte correlación cercana al 100%.

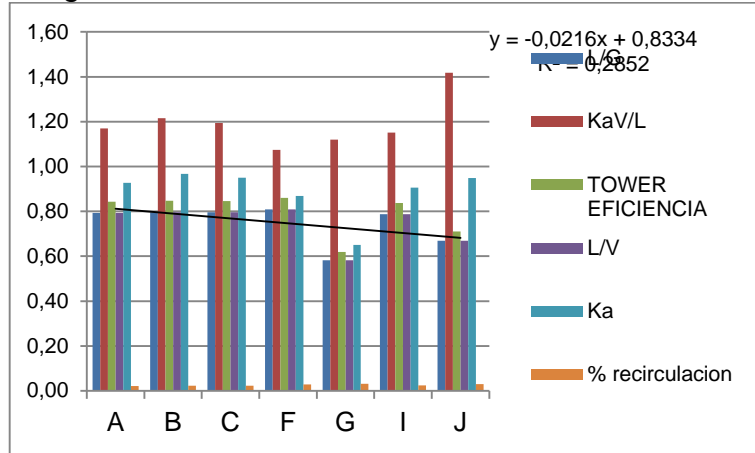
El análisis indica que el LG depende del comportamiento de las variables correlacionadas.

Los residuos hallados son muy pequeños por tal razón los pronósticos sobre la relación entre las variables es más objetivo.

El valor crítico de F también es un número muy bajo indicando mayor relación entre los datos obtenidos.

La figura 17 indica que el LG obtenido tiene una relación muy baja entre cada una de las celdas de la torre, esto se debe principalmente al estado de deterioro de las celdas F; G; I; J.

Figura 17. Análisis estadístico de los coeficientes.



Fuente: Autor del proyecto.

2.14 MODELO OPERACIONAL

Se plantea un modelo para la operación estandarizada y optima de la torre de enfriamiento para la identificación y solución de problemas, en base a las condiciones de diseño, instrumentación y operación; así como las recomendaciones más importantes para programar los mantenimientos y reducción de costos.

2.14.1 Relación de variables.

En el cuadro 30 se establecen las relaciones entre cada una de las variables más importantes de las torres enfriadoras y su interacción con las demás.

Cuadro 30. Relaciones entre variables claves.

¿SI SE INCREMENTA?	L/G	Rango	Aproximación	KaV/L	tao
Twb	No	No	Disminuye	No	Incrementa
TBS	Disminuye	No			
Thw	No	Incrementa	Incrementa	No	Incrementa
Flujo de aire	Disminuye	no	Disminuye	Incrementa	Disminuye
Flujo de agua	Incrementa	Disminuye	Incrementa	Disminuye	No

Fuente: COOLING TOWER INSTITUTE. CTI code tower.

- En caso de contaminaciones con hidrocarburo no superiores a 30 ppm se estima manejo con contingencia del tratamiento químico por un periodo de tiempo de dos semanas máximo.

- En caso de contaminaciones solo con H₂S con valores no superiores a 0.3 ppm se estima manejo con contingencia química por un periodo máximo de una semana.
- En caso de contaminación con solvente no es permisible la operación de los equipos aportantes por seguridad, medio ambiente y por desempeño del proceso.
- En caso de que se presenten contaminaciones de diferentes fuentes, no es permisible la operación simultánea de los equipos aportantes, deben ser aislados inmediatamente.

2.14.2 Manejo de purgas.



















Debido a que el régimen de purgas está siendo utilizado para disipar energía, evitar pérdidas de agua y garantizar un adecuado desempeño de los tratamientos químicos, se establecen dos criterios para el manejo de las mismas.⁵

CRITERIO 1: turbiedad (parámetro de control en 25 NTU máx.).

CRITERIO 2: conductividad (parámetro de control entre 900 y 1050 µmhos).

En la figura 18 se relaciona el régimen de purga recomendado según los criterios establecidos.

Figura 18. Régimen de purga.

CRITERIO 1	CRITERIO 2	REGIMEN DE PURGA
		Purga normal
		Purga normal
		Purga moderada
		Purga normal
		Purga moderada
		Purga normal
		Purga fuerte
		Purga moderada
		Purga fuerte

Fuente: Ingeniería proceso de Ecopetrol S.A.

⁵ Tomado de recomendación técnica de ingeniería de proceso Ecopetrol S.A sobre el manejo de purgas.

Dónde:

Purga normal: mantener la purga caliente en control automático y realizar purgas de fondo una vez al día en cada uno de los cuatro puntos de la torre enfriadora.

Purga moderada: mantener abierta en forma continua la purga caliente (aproximadamente un 5%) y realizar purgas de fondo una vez al día en cada uno de los cuatro puntos de la torre enfriadora.

Purga fuerte: mantener abierta la purga caliente de manera continua (aproximadamente un 10%) y realizar purgas de fondo una vez al turno en cada uno de los cuatro puntos de la torre enfriadora.

2.14.3 Identificación y solución de problemas.

Cuadro 31. Presencia de hidrocarburo en las celdas.

OBSERVACION	AUMENTO EN LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN SOBRE LAS SUPERFICIES METÁLICAS.
EFFECTO SOBRE LA OPERACIÓN	Reducción de la capacidad de enfriamiento
PROBLEMA IDENTIFICADO	Crecimiento microbiológico. Presencia de algas en paredes y accesorios de la torre enfriadora.
SOLUCION	Reforzar el control del crecimiento microbiológico con la utilización de biocidas, asegurando la presencia de residual de cloro en el agua de recirculación de la torre enfriadora.

Fuente: Autor del proyecto.

Cuadro 32. Aumento en la velocidad de corrosión sobre las superficies metálicas.

OBSERVACION	PRESENCIA DE HIDROCARBURO EN LAS CELDAS.
EFFECTO SOBRE LA OPERACIÓN	Reducción de la capacidad de enfriamiento y afectación al control químico sobre especies microbiológicas.
PROBLEMA IDENTIFICADO	Presencia de nata de hidrocarburo en las celdas de la torre. Incremento de temperatura en el agua de salida de la torre. Caída del residual de cloro.
SOLUCION	Identificación rápida y oportuna del aportante de hidrocarburo. Aislamiento del aportante o evaluación real de su impacto y manejo químico en la torre enfriadora. Medición continua de los residuales de H ₂ S en la azotea de la torre y en el área general de la unidad STE-2945. Incremento en la dosificación de cloro y aplicación de contingencia química para manejo de hidrocarburo.

Fuente: Autor del proyecto.

Cuadro 33. Lluvia constante alrededor de la torre enfriadora.

OBSERVACION	LLUVIA CONSTANTE ALREDEDOR DE LA TORRE ENFRIADORA.
EFFECTO SOBRE LA OPERACIÓN	Reducción de la capacidad de enfriamiento y pérdida de agua por arrastre.
PROBLEMA IDENTIFICADO	Eliminadores de rocío en mal estado, roto o faltante.
SOLUCION	Reparación y cambio de las piezas faltantes, en mal estado o rotas.

Fuente: Autor del proyecto.

Cuadro 34. Caudal de agua cae en forma de cascada.

OBSERVACION	CAUDAL DE AGUA CAE EN FORMA DE CASCADA.
EFFECTO SOBRE LA OPERACIÓN	Incremento de la temperatura de la torre enfriadora.
PROBLEMA IDENTIFICADO	Disparo del ventilador de tiro inducido
SOLUCION	Puesta en servicio del activo o cambiar operación de celda.

Fuente: Autor del proyecto.

Cuadro 35. Obstrucción en tuberías y equipos por presencia microbológica.

OBSERVACION	OBSTRUCCIÓN EN TUBERÍAS Y EQUIPOS POR PRESENCIA MICROBIOLÓGICA.
EFFECTO SOBRE LA OPERACIÓN	Incremento del consumo de energía. Reducción de la capacidad de enfriamiento en la torre de enfriamiento. Reducción de la capacidad de enfriamiento en equipos usuarios.
PROBLEMA IDENTIFICADO	Crecimiento microbológico. Coloración muy oscura en las purgas realizadas en los equipos y en la torre enfriadora.
SOLUCION	Realizar contingencia con tratamiento químico para eliminación y control bacteriano. Reforzar el control del crecimiento microbológico con la utilización de biocidas, asegurando la presencia de residual de cloro en el agua de recirculación de la torre enfriadora.

Fuente: Autor del proyecto.

Cuadro 36. Canalización, flujos anormales o cortes en la cascada de agua.

OBSERVACION	CANALIZACIÓN, FLUJOS ANORMALES O CORTES EN LA CASCADA DE AGUA.
EFECTO SOBRE LA OPERACIÓN	Reducción de la capacidad de enfriamiento
PROBLEMA IDENTIFICADO	<p>Incremento de consumo energético. Se requieren más celdas para ejecutar el mismo trabajo. Boquillas taponadas (Aplica para las celdas A-B-C-D) Distribuidores rotos. Alta presión en boquillas que generan salida por alivios. (Aplica para las celdas A-B-C-D).</p> <p>Taponamiento del relleno.</p> <p>Relleno incompleto, roto o doblado; causado principalmente por los altos flujos de agua.</p> <p>Desbalance en el flujo de agua por celda.</p> <p>Relleno incompleto, roto o doblado causado principalmente por los altos flujos de agua.</p>
SOLUCION	<p>Remover las boquillas para limpieza.</p> <p>Verificar amperaje de los ventiladores de tiro inducido para identificar cual activo no está realizando trabajo.</p> <p>Verificación y cambio de distribuidores rotos.</p> <p>Asegurar control de presión de entrada de las celdas en 12 Psig.</p> <p>Balancear el flujo de agua en cada una de las celdas de la torre.</p> <p>Programar retiro y limpieza del relleno, con la asesoría de la empresa química realizar contingencia química para remoción de los lodos.</p> <p>Se debe realizar medición del flujo de agua en las celdas y calibrar con la válvula mariposa de entrada el flujo requerido para su normal operación (el flujo por diseño por celda es de 7667 gpm)</p>

Fuente: Autor del proyecto.

Cuadro 37. Purga abierta.

OBSERVACION	PURGA ABIERTA.
EFECTO SOBRE LA OPERACIÓN	Bajos ciclos de concentración de la torre.
PROBLEMA IDENTIFICADO	Altos costos operacionales.
SOLUCION	Cerrar purgas.

Fuente: Autor del proyecto.

Cuadro 38. Suciedad en el relleno.

OBSERVACION	SUCIEDAD EN EL RELLENO.
EFFECTO SOBRE LA OPERACIÓN	Incremento en el consumo de energía y reducción en la capacidad de enfriamiento.
PROBLEMA IDENTIFICADO	Zonas de la torre donde no se realiza transferencia de masa y energía. Altos ciclos de concentración. Contaminaciones del proceso. Presencia de Grasas y aceites. Alto contenido de bacterias.
SOLUCION	Aumentar el flujo de aire para que la relación L/G disminuya logrando mayor eficiencia de la celda y consecuentemente mejore la capacidad de enfriamiento. Incrementar residuales de cloro en el sistema para eliminar la suciedad producto de acumulación microbiológica. Incrementar las velocidades del agua para evitar la adherencia de los sólidos.

Fuente: Autor del proyecto.

Cuadro 39. Ruido anormal o percepción de vibración estructural.

OBSERVACION	RUIDO ANORMAL O PERCEPCIÓN DE VIBRACIÓN ESTRUCTURAL.
EFFECTO SOBRE LA OPERACIÓN	Baja eficiencia del ventilador. Incremento en el consumo de energía. Reducción del flujo de aire. Afectación estructural de torre enfriadora.
PROBLEMA IDENTIFICADO	Desbalanceo del ventilador. Sensor de vibración no refleja el comportamiento del activo. Alguna de las aspas se soltó del seguro anti giro. Amperaje en la celda es alto o evidencia un comportamiento anormal.
SOLUCION	Sacar de servicio la celda y balancear el ventilador. Revisión y cambio de pernos de anclaje del reductor y del motor del ventilador. Verificar y calibrar ángulo de inclinación de las aspas del ventilador. Revisión de reductor para determinar la eficiencia en la lubricación.

Fuente: Autor del proyecto.

Cuadro 40. Ruido anormal en el ventilador.

OBSERVACION	RUIDO ANORMAL EN EL VENTILADOR.
EFEECTO SOBRE LA OPERACIÓN	Incremento de consumo de energía del ventilador.
PROBLEMA IDENTIFICADO	Angulo de inclinación de las aspas mayor de 15 grados. Desbalanceo del ventilador; fallas en el sistema de lubricación del reductor. Fallas del sensor de vibración.
SOLUCION	Inspeccionar reductor. Verificación del alineamiento del reductor. Calibrar en campo el ángulo de inclinación de las aspas del ventilador. Sacar de servicio el activo y verificar la lectura registrada por el sensor de vibración.

Fuente: Autor del proyecto.

Cuadro 41. Formación de niebla.

OBSERVACION	FORMACION DE NIEBLA.
EFEECTO SOBRE LA OPERACIÓN	Reducción de la capacidad de enfriamiento Incremento del consumo de energía.
PROBLEMA IDENTIFICADO	El aire saturado de la torre sale y se encuentra con una atmosfera fría generando condensación, esto produce capas de niebla densa en el área de las torres, generado riesgos ocupacionales sobre los operadores; este fenómeno ocurre principalmente en horas nocturnas o a primera hora del día cuando la temperatura ambiente es baja precedida especialmente de lluvia.
SOLUCION	Dentro de las rondas del operador puede realizar observaciones a distancia prudencial documentando la hora de ocurrencia del fenómeno para evitar el tránsito de personas por el área y para proteger ocupacionalmente al operador de turno.

Fuente: Autor del proyecto.

Cuadro 42. Altos flujos de purga de lodos.

OBSERVACION	ALTOS FLUJOS DE PURGA DE LODOS.
EFEECTO SOBRE LA OPERACIÓN	Reducción de los ciclos de concentración Incremento del flujo de agua de restitución. Bajas velocidades del agua circulante. Reducción de la capacidad de transferencia de calor.
PROBLEMA IDENTIFICADO	Altas velocidades de corrosión. Contaminación con hidrocarburo. Incremento de costos sobre los tratamientos químicos.
SOLUCION	Poner en servicio una celda para incrementar la velocidad del agua y evitar la acumulación de los sedimentos. Realizar auditoria a la dosificación química para garantizar el control sobre los residuales de los inhibidores de corrosión y estabilizante de cloro.

Fuente: Autor del proyecto.

Cuadro 43. La temperatura del agua sale muy caliente y se requiere eliminar mayor cantidad de calor.

OBSERVACION	LA TEMPERATURA DEL AGUA SALE MUY CALIENTE Y SE REQUIERE ELIMINAR MAYOR CANTIDAD DE CALOR
EFFECTO SOBRE LA OPERACIÓN	No se logra la capacidad de enfriamiento requerido.
PROBLEMA IDENTIFICADO	Alta presión en el sistema generando contrapresión e incremento de flujo de agua en las celdas. Ventiladores con bajo amperaje. Alto flujo de agua de recirculación.
SOLUCION	Balancear el flujo de agua de las celdas. Verificar y asegurar la presión de retorno a la celda en 12 psig. Con recomendación técnica variar el ángulo de inclinación de los ventiladores para aumentar su potencia.

Fuente: Autor del proyecto.

Cuadro 44. Elevados ciclos de concentración.

OBSERVACION	ELEVADOS CICLOS DE CONCENTRACIÓN.
EFFECTO SOBRE LA OPERACIÓN	Incrementos en el consumo de agua de restitución. Incrementos en los costos de operación y tratamientos químicos.
PROBLEMA IDENTIFICADO	Elevada concentración de especies químicas.
SOLUCION	Incrementos en las purgas intermitentes y continuas de la torre enfriadora. Verificación de la concentración de sales en el agua de restitución para determinar si fue producto de dato puntual o en su defecto fue producto de la concentración en sales de la torre enfriadora.

Fuente: Autor del proyecto.

Cuadro 45. Purga caliente se mantiene abierta aun con los ciclos y la conductividad en control.

OBSERVACION	PURGA CALIENTE SE MANTIENE ABIERTA AUN CON LOS CICLOS Y LA CONDUCTIVIDAD EN CONTROL.
EFFECTO SOBRE LA OPERACIÓN	Bajos ciclos de concentración. Retiros calor por medio de purga. Incremento de temperatura en los sistemas de aguas lluvias.
PROBLEMA IDENTIFICADO	Ocultamiento de la ineficiencia en el retiro de calor de la torre enfriadora. Caída de los ciclos de concentración y consecencialmente de las especies químicas de la torre enfriadora
SOLUCION	Purgar la torre en función de los ciclos de concentración. Mantener purga continua abierta de acuerdo a las especies químicas y dentro de los ciclos de concentración recomendados.

Fuente: Autor del proyecto.

Cuadro 46. Salida de agua por tubos de alivio de los distribuidores.

OBSERVACION	SALIDA DE AGUA POR TUBOS DE ALIVIO DE LOS DISTRIBUIDORES.
EFFECTO SOBRE LA OPERACIÓN	Reducción de la capacidad de enfriamiento.
PROBLEMA IDENTIFICADO	Alta presión de agua de retorno a la torre. Taponamiento en distribuidores y boquillas.
SOLUCION	Verificar estado de las boquillas. Monitorear la presión de retorno a las celdas y ajustarla a 12 psig. Verificar la presión de descarga de las bombas de recirculación; el control de diseño para la torre es de 50 psig.

Fuente: Autor del proyecto.

Cuadro 47. Presencia de incrustaciones en la tubería del sistema.

OBSERVACION	PRESENCIA DE INCRUSTACIONES EN LA TUBERÍA DEL SISTEMA.
EFFECTO SOBRE LA OPERACIÓN	Reducción de la capacidad de transferencia térmica de intercambiadores.
PROBLEMA IDENTIFICADO	Alta presión en el sistema. Taponamiento y daño en sistema de distribuidores y boquillas. Altos ciclos de concentración.
SOLUCION	Bajar ciclos de concentración a los parámetros de control. Incrementar velocidades al flujo. Incrementar contraflujos en los equipos usuarios. Aplicación de inhibidores de incrustación de acuerdo a recomendación técnica.

Fuente: Autor del proyecto.

Cuadro 48. Agua con altos valores de turbiedad (>30 NTU).

OBSERVACION	AGUA CON ALTOS VALORES DE TURBIEDAD (>30 NTU).
EFFECTO SOBRE LA OPERACIÓN	Reducción de la capacidad de enfriamiento. Taponamiento. Incremento de colonias bacterianas.
PROBLEMA IDENTIFICADO	Alta presión en el sistema Taponamiento en el sistema. Alto ciclos de concentración.
SOLUCION	Aseguramiento de la calidad del agua de restitución, verificando la calidad del agua clarificada. Incremento del residual de cloro. Incremento de purgas. Retro lavado en equipos usuarios. Realizar prueba al sistema para detección de presencia de hidrocarburo.

Fuente: Autor del proyecto.

Cuadro 49. Crecimiento microbiológico.

OBSERVACION	CRECIMIENTO MICROBIOLÓGICO.
EFEECTO SOBRE LA OPERACIÓN	Taponamiento del sistema. Corrosión bajo depósito en líneas y equipos.
PROBLEMA IDENTIFICADO	Presencia de Slim en las paredes de la torre enfriadora. Bajos residuales de cloro. Falla en el programa de tratamientos químicos de la torre. Reducción en la inyección de biodispersante. Cambio en la coloración del agua circulante. Incremento de la coloración y turbiedad del agua.
SOLUCION	Incremento de biocida oxidante como cloro. Incremento en la dosificación de biodispersante. Programar limpieza de los lodos de la piscina de la torre. Incremento de purgas.

Fuente: Autor del proyecto.

Cuadro 50. Alta concentración de aluminio.

OBSERVACION	ALTA CONCENTRACIÓN DE ALUMINIO.
EFEECTO SOBRE LA OPERACIÓN	Incremento de la corrosión por ausencia del inhibidor anódico.
PROBLEMA IDENTIFICADO	Bajo pH en el agua de restitución. Alto residual de cloro en el agua de restitución.
SOLUCION	Mejorar la calidad del agua clarificada de restitución, implementar choque químico para recuperar los niveles de fosfato en el agua circulante.

Fuente: Autor del proyecto.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 CÁLCULO DE LA EVAPORACIÓN

$$evaporacion\% = \frac{\Delta(w_2 - w_1)}{\frac{L}{G}}$$

W₁: Humedad Absoluta en Lb vapor de agua por Lb de aire seco⁶.

W₂: Humedad Absoluta en Lb vapor de agua por Lb de aire seco

Cuadro 51. Cálculo de evaporación del agua.

CÁLCULO DE EVAPORACIÓN DEL AGUA.				
CELDA	IN (w ₁)	OUT (w ₂)	Δ(w ₂ - w ₁)	Evaporación %
A	0,0333	0,0395	0,0062	0,78%
B	0,0326	0,0393	0,0068	0,85%
C	0,0326	0,0398	0,0073	0,92%
F	0,0346	0,0418	0,0136	0,89%
G	0,0326	0,0367	0,0042	0,72%
I	0,0330	0,0392	0,0062	0,79%
J	0,0364	0,0392	0,0028	0,42%
STE-2945	0,0332	0,0393	0,0062	0,83%

Fuente: Autor del proyecto.

El cuadro 51 contiene los valores de la humedad absoluta de las temperaturas de bulbo seco y de las temperaturas de salida por el cono de cada celda tomadas por tabla del libro "Cooling Tower Institute" para relacionarlas con el L/G obtenido del proceso operacional de cada celda y hallar el porcentaje de evaporación.

3.2 CÁLCULO DE RESTITUCIÓN DE AGUA

En el desarrollo del presente trabajo no se encontró información de las boquillas de los ventiladores de las celdas desde la "E" a la "J" al realizar verificación en campo se encontró que efectivamente estas celdas en mención no tienen boquillas como tampoco hay evidencia de haber sido retiradas. Se debe continuar con el programa de intervención de celdas en la torre para garantizar la instalación de boquillas aspersores que benefician la transferencia de energía

En el cuadro 52 Se puede estimar que las pérdidas por arrastre es máximo 0,3% del agua circulante en el sistema y consecencialmente la pérdida total de agua producto de su operación es de 1118 gpm.

⁶ Fuente: cooling tower institute. CTI code tower table 23.

Cuadro 52. Pérdidas de agua.

Pérdida de agua (gpm).					Reposición calculada
CELDA	% Evaporación	Evaporación	Purga	Arrastre	Gpm
A	0,78%	77,23	75	30	182
B	0,85%	84,00	74	30	188
C	0,92%	87,87	72	29	189
F	0,89%	67,5	57	23	147,5
G	0,72%	53,89	56	22	132
I	0,79%	57,43	54	22	134
J	0,42%	33,41	59	24	116
STE-2945	0,83%	492,01	447	179	1.117,97

Fuente: Autor del proyecto.

Los altos valores en el flujo y temperatura en la salida del agua indican que las celdas A; B y C presentan problemas de capacidad de enfriamiento y su potencial no se está aprovechando adecuadamente.

La torre enfriadora está consumiendo un 63% de agua adicional a la calculada; se espera que este valor no supere el 20% y asociado especialmente a retro lavados en activos de las áreas de proceso y a purgas calientes y/o de fondo en la torre enfriadora.

La distribución de los dispersores son críticos para asegurar una distribución uniforme asegurando la cobertura de todo el área de la celda; en términos generales se debe asegurar una distribución homogénea superior al 90% del área de la celda; actualmente los distribuidores de las celdas E; G; H; I y J se encuentran en muy mal estado con canalización del flujo y se observa tubería de los distribuidores en el piso.

Gran parte del calor disipado en la torre enfriadora se produce en el proceso de evaporación, es claro que los niveles de concentración de las especies químicas se incrementarán, por tal razón se debe purgar parte de la corriente que recircula en el sistema y realizar reposiciones de agua para mantener las concentraciones de sales en el agua que recircula. Los eliminadores de rocío operan inadecuadamente debido a secciones rotas, dobladas o faltantes y posiblemente inapropiada instalación.

En el cuadro 53 está referenciado el valor de restitución de agua a la torre enfriadora en el periodo entre el 01 de junio al 30 de junio del año 2015, indicando que la torre enfriadora está consumiendo un 63% de agua adicional a la calculada; se espera que este valor no supere el 20% adicional asociado especialmente a retro lavados y purgas por pérdidas en las unidades de proceso.

Cuadro 53. Restitución de agua.

RESTITUCION DE AGUA.	PROMEDIO.
Restitución real ⁷ .	1.769
Calculado.	1.117
% sobre consumo de agua.	63%

Fuente: Autor del proyecto.

La temperatura de salida del agua es totalmente dependiente de la cantidad de aire que ingresa; si la cantidad de aire disminuye el efecto observado es el incremento de temperatura del agua de salida.

La temperatura de salida del agua de la torre puede ser menor que la temperatura atmosférica pero no puede ser menor o igual (aproximación) a la temperatura de bulbo húmedo.

Ajustar la presión de atomización a valores razonables, permite disminución del perfil de temperatura de salida del agua debido a que la relación L/G (liquido/gas) disminuye; en otras palabras mayor aire para manejar la misma cantidad de agua.

3.3 CÁLCULO DE RECIRCULACIÓN DE AIRE

En el cuadro 54 se calcula la recirculación en cada una de las celdas, este valor no debe ser superior al 3% del aire que circula por la celda porque restringe la operación del ventilador de tiro inducido con incremento de amperaje y reduce el delta de acción de la fuerza impulsora; en conclusión el ventilador operaría con alta carga de energía y el retiro de calor se reduciría ostensiblemente.

$$\%Recirculacion = \frac{E_{wb} - E_a}{E_{ao} - E_a} * 100$$

Los efectos de las altas recirculaciones de aire, incrementan la temperatura del bulbo húmedo del aire que ingresa a la torre enfriadora a valores superiores de la temperatura de bulbo húmedo; estas condiciones consecencialmente generan un incremento en la temperatura del agua que sale de la torre enfriadora, en las revisiones de campo se observa que las celdas en operación de la torre enfriadora no evidencia altos valores de recirculación.

⁷ Fuente: Dato promedio tomado en tiempo real de la herramienta corporativa PI Web para análisis operacional.

Cuadro 54. Cálculos para determinar el porcentaje de recirculación.

CELDA	Ewb	Twb	Eao	Tea	Ea	Recirculación
A	43,37	79,7	66,88	79,2	42,84	2,20%
B	43,37	79,7	66,72	79,2	42,84	2,22%
C	43,26	79,58	67,39	79,08	42,69	2,31%
F	48,4	84,14	69,96	83,64	47,78	2,80%
G	46,46	82,52	63,32	82,02	45,92	3,10%
I	43,47	79,76	66,55	79,26	42,9	2,41%
J	47,39	83,3	66,55	82,8	46,81	2,94%
Promedio	45,103	81,243	66,767	80,743	44,540	2,57%

Fuente: Autor del proyecto.

3.4 MEDICIONES DE AIRE EN CADA CELDA

Flujo de aire celda A = Area * Velocidad

$$\text{Flujo de aire A} = 57,18 \text{ m}^2 * 5,8 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 331,62 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$\text{Flujo masico de aire A} = \rho * \text{flujo} = 1,1450 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} * 331,62 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 379,7 \frac{\text{Kg}}{\text{s}}$$

En el cuadro 55 se anexa el resultado de cada una de las mediciones de aire en las celdas de la torre enfriadora, el flujo de aire esperado por diseño es de 435 m³/s, el promedio alcanzado del estudio en campo fue de 345,2 m³/s, lo que indica una operación de los ventiladores solo del 79% de la capacidad instalada, lo cual concluye que se debe incrementar el ángulo de las aspas a los ventiladores para obtener un mejor rendimiento de ellos.

Cuadro 55. Mediciones de aire

MEDICIONES DEL AIRE.					
Celda	Densidad del Aire Kg/m ³	Área (m) ²	Velocidad (m/s)	Flujo de aire (m ³ /s)	Flujo másico (Kg/s)
A	1,1450	57,18	5,80	331,62	379,70
B	1,1463	57,18	5,70	325,90	373,60
C	1,1463	57,18	5,98	341,63	391,62
F	1,1425	57,18	6,21	355,21	405,82
G	1,1465	57,18	6,28	358,78	411,33
I	1,1457	57,18	6,13	350,20	401,21
J	1,1443	57,18	6,18	353,06	404,02
Promedio	1,21	57,18	6,04	345,20	395,33

Fuente: Autor del proyecto.

3.5 MEDICIONES DE POTENCIA DE LOS VENTILADORES DE TIRO INDUCIDO.

$$\text{Celda A} = \frac{(\sqrt{3} * 192,33 * 474 * 0,86 * 0,90)}{746}$$

$$\text{Celda A} = 163,83 \text{ HP}$$

$$\text{Potencia operativa} = \frac{\text{Potencia real}}{\text{potencia diseño}}$$

$$\text{Celda A} = \frac{163,83}{215,51} = 76\%$$

$$\text{Consumo celda A} = \frac{(\sqrt{3} * 192,33 * 474 * 0,86 * 0,90)}{1000}$$

$$\text{Celda A} = 122,22 \text{ KW} - \text{h}$$

En el cuadro 56 observamos que la variable de inclinación de las aspas de cada uno de los ventiladores de tiro inducido es menor a 12 grados de los cuales cinco operan con valores menores a 10 grados de inclinación, razón por la cual en promedio trabajan al 73% de su capacidad nominal; esto al contrario de ahorrar energía afecta el L/G de cada celda y obliga a operar con ventiladores adicionales para compensar la baja eficiencia. Se concluye que todos los ventiladores están operando muy por debajo de la potencia requerida.

Cuadro 56. Datos de operación de los ventiladores de tiro inducido.

VENTILADORES.								
CELDAS		AMPERAJE			POTENCIA			
SU-2945	∠ Aspas	Diseño	Real	Voltaje	Diseño (HP)	Real (HP)	Trabajo	Real (KW)
A	9,4	253	192,33	474	215,51	163,83	76,0%	122,22
B	9,4	253	188,33	474	215,51	160,42	74,4%	119,68
C	9,3	278	195,67	474	236,80	166,67	70,4%	124,34
F	11,6	253	207,33	474	215,51	176,61	81,9%	131,75
G	11,6	278	205,00	474	236,80	174,62	73,7%	130,27
I	9,9	253	189,00	474	215,51	160,99	74,7%	120,10
J	9,9	253	190,00	474	215,51	161,84	75,1%	120,74
Promedio	10,29	265,50	195,38	474,00	226,15	166,43	73,6%	124,15

Fuente: Autor del proyecto.

La torre enfriadora opera de manera ineficiente debido a que opera un 11% por encima del flujo de diseño (53669 gpm vs 59616 gpm) para una operación continua con 7 celdas, indicando que se debe poner en servicio una celda adicional para compensar los flujos de agua.

3.6 CÁLCULO DE POTENCIA DE LAS BOMBAS CENTRIFUGAS DE LA TORRE ENFRIADORA

$$\text{Bomba A} = \frac{(\sqrt{3} * 82 * 4160 * 0,90 * 1)}{746}$$

Bomba A = 712,81 vatios.

$$\text{Potencia operativa} = \frac{\text{Potencia real}}{\text{potencia diseño}}$$

$$\text{Bomba A} = \frac{712,81}{782,35} = 91,1\%$$

$$\text{Consumo (Kw)} = \frac{(\sqrt{3} * \text{amp} * \text{voltaje} * \text{factor de potencia} * \text{eficiencia})}{1000}$$

$$\text{Consumo Bomba A} = \frac{(\sqrt{3} * 82 * 4160 * 0,90 * 1)}{1000}$$

Bomba A = 531,75 KW-h

En el cuadro 57 se evidencia que Actualmente operan 4 bombas con una potencia de trabajo en promedio de 505 kw-h, la capacidad instalada por diseño de los motores de las bombas es de 1000 kw-h, lo que indica que están trabajando en promedio al 86,7% de la potencia de los motores.

La diferencia de presiones de las bombas SP-2945 indica que la bomba F maneja mayor presión 60 psig y la bomba "E" maneja 53 psig evidenciando una contrapresión que dificulta la entrada de esta bomba al cabezal principal generándole daños a los componentes internos por operar por debajo de la curva de eficiencia del activo.

Cuadro 57. Datos de operación de las bombas centrifugas.

BOMBAS CENTRIFUGAS.								
BOMBAS		AMPERAJE			POTENCIA			
SP-2945	Presión descarga (PSIG)	Diseño	Real	Voltaje	Diseño (HP)	Real HP)	Trabajo	Real (KW)
A	55	90	82,00	4160	782,35	712,81	91,1%	531,75
B	58	90	79,00	4160	782,35	686,73	87,8%	512,30
E	53	90	67,00	4160	782,35	582,41	74,4%	434,48
F	60	90	84,00	4160	782,35	730,19	93,3%	544,72
Promedio	56,5	90,00	78,00	4160,00	782,35	678,04	86,7%	505,81

Fuente: Autor del proyecto.

Se concluye que operando solo con tres bombas el flujo de agua de recirculación incrementará la velocidad y la presión del sistema en el retorno será de acuerdo al diseño en 12 psig, consecencialmente se debe poner en servicio una celda y operar con 8 en total, con las respectivas consecuencias positivas de ahorro energético.

El cabezal de agua de enfriamiento maneja una presión mayor a la de diseño de 12 psig en línea de retorno de cada celda, la presión actualmente en el retorno opera con valores de hasta 15 psig afectando la operación de los distribuidores de cada celda y generando salida de agua por líneas de alivio de cada una de las celdas.

Los requerimientos de flujo de las plantas son de 57000 gpm de acuerdo a los históricos; adicionalmente cada bomba centrifuga tiene una capacidad de 23000 gpm; indicando que la torre puede operar perfectamente con tres bombas sin superar el consumo nominal de diseño de los activos.

3.7 DETERMINACIÓN DEL L/G

Se obtiene relacionando las entalpias con el rango en cada una de las celdas; la obtención de este factor es muy importante porque permite conocer la relación entre el líquido y el gas que circula en cada celda, ayuda igualmente a pronosticar que tan alejada esta la transferencia térmica del diseño.

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

En el cuadro 58 se referencia los datos obtenidos en campo de temperatura y las entalpias producto de las tablas obtenidas en las especificaciones cooling tower institute⁸.

Cuadro 58. Resultados de L/G para cada una de las celdas.

L/G.								
CELDA	Flujo gpm	T _{wb}	E _{wb}	T _{hw}	T _{cw}	TE _{ao}	E _{ao}	L/G
A	9935,5	79,7	43,37	121,00	91,33	97,2	66,88	0,792
B	9865,3	79,7	43,37	119,67	90,33	97,1	66,72	0,796
C	9583,6	79,58	43,26	121,00	90,67	97,5	67,39	0,795
F	7586,4	84,14	48,4	120,67	94,00	99,0	69,96	0,809
G	7478,8	82,52	46,46	121,00	92,00	95,0	63,32	0,581
I	7260,8	79,76	43,47	120,33	91,00	97,0	66,55	0,787
J	7905,6	83,3	47,39	119,00	90,33	97,0	66,55	0,668
Sumatoria	59615,9							
PROMEDIOS	8516,6	81,24	45,10	120,38	91,38	97,11	66,77	0,747

Fuente: Autor del proyecto.

⁸ Fuente: cooling tower institute. CTI code tower, standard specifications

3.8 DETERMINACIÓN DEL KaV/L.

En los cuadros 59 y 60 se relacionan cada una de las variables requeridas para hallar los factores para calcular el KaV/L y son principalmente la entalpía del aire con el rango y el L/G.

Cuadro 59. Cálculos requeridos para calcular el KaV/L.

CELDA	$h_2 = E_{wb} + (T_{hw} - T_{cw}) * L/G$	$0,1 * (T_{hw} - T_{cw}) * L/G$	$0,4 * (T_{hw} - T_{cw}) * L/G$
A	66,9	2,35	9,404
B	66,7	2,34	9,34
C	67,4	2,41	9,652
F	70,0	2,16	8,624
G	63,3	1,69	6,744
I	66,6	2,31	9,232
J	66,6	1,92	7,664
PROMEDIOS	66,8	2,17	8,67

Fuente: Autor del proyecto.

Cuadro 60. Cálculos adicionales para hallar el KaV/L.

CELDA	$0,1 * (T_{hw} - T_{cw})$	$0,4 * (T_{hw} - T_{cw})$
A	2,967	11,87
B	2,933	11,73
C	3,033	12,13
F	2,667	10,67
G	2,900	11,60
I	2,933	11,73
J	2,867	11,47
PROMEDIOS	2,900	11,60

Fuente: Autor del proyecto.

En los cuadros 61 y 62 se determinan los factores necesarios para hallar la entalpía de saturación del aire, en términos generales este valor nos indicara la fuerza impulsora de cada una de las celdas de la torre enfriadora.

Cuadro 61. Cálculos para determinar hw.

CELDA	CÁLCULOS PARA DETERMINAR hw.			
	$T_{cw} + 0,1 * (\Delta T)$	$T_{cw} + 0,4 * (\Delta T)$	$T_{hw} - 0,4 * (\Delta T)$	$T_{hw} - 0,1 * (\Delta T)$
	A	B	C	D
A	94,30	103,20	109,13	118,03
B	93,27	102,07	107,93	116,73
C	93,70	102,80	108,87	117,97
F	96,67	104,67	110,00	118,00
G	94,90	103,60	109,40	118,10
I	93,93	102,73	108,60	117,40
J	93,20	101,80	107,53	116,13
PROMEDIO	94,28	102,98	108,78	117,48

Fuente: Autor del proyecto.

Cuadro 62. Determinación del hw.

DETERMINACION DE hw (BTU).					
CELDA	Thw	Hw	hw	hw	hw
	E	A	B	C	D
A	121,00	60,70	77,73	90,319	113,547
B	119,67	60,655	75,56	87,606	109,784
C	121,00	61,31	76,96	89,731	113,37
F	120,67	66,012	80,66	92,34	113,46
G	121,00	63,16	78,52	90,94	113,75
I	120,33	61,658	76,827	89,11	111,71
J	119,00	60,55	75,04	86,716	108,094
Promedio	120,38	62,01	77,33	89,54	111,96
Resultado interpolado		62,198	77,302	89,524	111,942

Fuente: Autor del proyecto.

En los cuadros 63 y 64 obtenemos los factores para el cálculo de la entalpía del aire de acuerdo al método de Merkel que junto al factor obtenido de la entalpía del aire saturado podemos determinar la fuerza impulsora de cada una de las celdas y el global de la torre enfriadora referenciadas en el cuadro 65.

Cuadro 63. Cálculos para determinar h₂.

CÁLCULOS PARA DETERMINAR h ₂ .				
CELDA	Ewb	Thw	$h_2 = Ewb + (Thw - Tcw) * L/G$	L/G
A	43,37	79,70	66,88	0,792
B	43,37	79,70	66,72	0,796
C	43,26	79,58	67,39	0,795
F	48,4	84,14	69,96	0,809
G	46,46	82,52	63,32	0,581
I	43,47	79,76	66,55	0,787
J	47,39	83,30	66,55	0,668
Promedio	45,10	81,24	66,77	0,75

Fuente: Autor del proyecto.

Cuadro 64. Determinación del ha.

DETERMINACION DEL ha.					
CELDA	(Thw - Tcw)	$Ewb + 0,1 * (\Delta T) \frac{L}{G}$	$Ewb + 0,4 * (\Delta T) \frac{L}{G}$	$h_2 - 0,4 * (\Delta T) \frac{L}{G}$	$h_2 - 0,1 * (\Delta T) \frac{L}{G}$
	ΔT	ha (A)	ha (B)	ha (C)	ha (D)
A	29,67	45,721	52,774	57,476	64,529
B	29,33	45,705	52,71	57,38	64,385
C	30,33	45,673	52,912	57,738	64,977
F	26,67	50,556	57,024	61,336	67,804
G	29,00	48,146	53,204	56,576	61,634
I	29,33	45,778	52,702	57,318	64,242
J	28,67	49,306	55,054	58,886	64,634
Promedio	29,00	47,27	53,77	58,10	64,60

Fuente: Autor del proyecto.

Cuadro 65. Relación de entalpías.

RELACION DE ENTALPIAS.					
	(hw-ha)	(hw-ha)	(hw-ha)	(hw-ha)	Fuerza impulsora
CELDA	ΔA	ΔB	ΔC	ΔD	(hw-ha)
A	14,98	24,96	32,84	49,02	30,45
B	14,95	22,85	30,23	45,40	28,36
C	15,64	24,05	31,99	48,39	30,02
F	15,46	23,64	31,00	45,66	28,94
G	15,01	25,32	34,36	52,12	31,70
I	15,88	24,13	31,79	47,47	29,82
J	11,24	19,99	27,83	43,46	25,63
PROMEDIOS	14,74	23,56	31,44	47,36	29,27

Fuente: Autor del proyecto.

3.8.1 DETERMINACIÓN DE KaV/L EN CADA CELDA.

En el cuadro 66 se identifica la importancia de la fuerza impulsora en el cálculo del KaV/L con relación al rango obtenido en cada celda; en términos generales y deduciendo el factor de transferencia se identifica que a medida que este valor se incrementa se presentan mayores restricciones en la operación de la celda de la torre enfriadora.

La celda con mejor comportamiento en la “F” y está influenciado porque maneja un menor rango de temperatura; sin embargo esto no garantiza su operación óptima, lo que significa es que su operación está dentro de los requerimientos del sistema, mientras otras celdas están asumiendo la carga térmica.

$$KaV/L = ((\sum A+B+C+D)/4)*\Delta T)$$

Cuadro 66. Determinación de KaV/L.

DETERMINACION DE KaV/L.							
CELDA	$\frac{1}{(hw-ha)}$	$\frac{1}{(hw-ha)}$	$\frac{1}{(hw-ha)}$	$\frac{1}{(hw-ha)}$	$\sum A+B+C+D$	ΔT	$\frac{KaV}{L}$
	A	B	C	D			
A	0,067	0,040	0,030	0,020	0,16	29,667	1,169
B	0,067	0,044	0,033	0,022	0,17	29,333	1,216
C	0,064	0,042	0,031	0,021	0,16	30,333	1,194
F	0,065	0,042	0,032	0,022	0,16	26,667	1,074
G	0,067	0,040	0,029	0,019	0,15	29,000	1,119
I	0,063	0,041	0,031	0,021	0,16	29,333	1,151
J	0,089	0,050	0,036	0,023	0,20	28,667	1,418
Promedio	0,069	0,043	0,032	0,021	0,164	29,00	1,192

Fuente: Autor del proyecto.

3.9 EFICIENCIA DE CADA UNA DE LAS CELDAS DE LA TORRE ENFRIADORA

En el cuadro 67 se relaciona el L/G hallado en el presente estudio con el de diseño para obtener la eficiencia de las celdas de la torre enfriadora.

El L/G por diseño es de 0,94 numero adimensional y se espera que la torre opere con eficiencias mayores a 90% alcanzando valores máximos de 105%.

El resultado del estudio determina que todas las celdas están por debajo de su valor de operación y está asociado directamente al desbalance hidráulico en el agua de recirculación con la que opera cada celda. En términos generales las celdas con menor rendimiento son las “G” y “J”

Cuadro 67. Cálculo de Eficiencia STE-2945.

EFICIENCIA DE LA TORRE ENFRIADORA.	
CELDA	$\frac{L/G \text{ TEST}}{L/G \text{ DESIGN}}$
A	84,31%
B	84,68%
C	84,63%
F	86,01%
G	61,85%
I	83,70%
J	71,10%
Promedio	79,47%

Fuente: Autor del proyecto.

3.9.1 DETERMINACIÓN DE LA CURVA CARACTERÍSTICA DE CADA CELDA

En el cuadro 68 el factor “C” obtenido es indispensable para determinar la relación entre el L/G y el KaV/L en las condiciones de diseño y es clave para hallar la curva que caracteriza la torre.

Cuadro 68. Determinación de la curva característica.

DETERMINACION DE LA CURVA CARACTERÍSTICA			
DESIGN	0,94		curva característica
CELDA	L/G	KaV/L	$\frac{KaV/L}{(L/G)^{0,6}}$
A	0,792	1,169	1,0171
B	0,796	1,216	1,0601
C	0,795	1,194	1,0409
F	0,809	1,074	0,9458
G	0,581	1,119	0,8084
I	0,787	1,151	0,9967
J	0,668	1,418	1,1138
Promedio	0,747	1,192	1,001

Fuente: Autor del proyecto.

$$C = \frac{KaV/L}{(L/G)^{-0,6}}; \quad C = \frac{1,169}{(0,792)^{-0,6}} = 1,0171$$

3.10 CÁLCULO DEL CALOR REMOVIDO EN LA TORRE ENFRIADORA.

La cantidad de calor removida por el agua en la torre enfriadora está dada por la ecuación:

$$Q = L * \Delta(T_{hw} - T_{cw})$$

$$\text{Fuerza impulsora} = (h_w - h_a)$$

En el cuadro 69 se evalúa la remoción de calor por cada una de las celdas donde se relaciona la fuerza impulsora con el flujo de recirculación.

Las eficiencias obtenidas por encima de 105% no son adecuadas porque indican que están asumiendo gran parte del trabajo y atenta contra los distribuidores, dispersores y puede generar daños prematuros en el relleno.

Se espera que la eficiencia sea mínimo del 90% siempre que el flujo de circulación sea de 7600 gpm.

Cuadro 69. Remoción de calor en MBTU/H.

CELDA	FLUJOS	Remoción de calor en MBTU/H			fuerza impulsora
		Actual	diseño	eficiencia	(hw-ha)
A	9.914	147	123	120%	30,45
B	9.763	143	123	116%	28,36
C	9.525	144	123	117%	30,02
F	7.684	102	123	83%	28,94
G	7.662	111	123	90%	31,70
I	7.312	107	123	87%	29,82
J	7.669	110	123	89%	25,63
STE-2945	59.528	863,2	861	100,25%	29,27

Fuente: Autor del proyecto.

La transferencia térmica ganada por el agua circulante en la unidad de balance⁹ es producto de los procesos unitarios en las plantas y permiten conocer las condiciones operacionales actuales de la torre enfriadora; estos valores están registrados en el cuadro 70.

⁹ Fuente: ECOPETROL S.A. Proceso de eliminación de defectos. ANÁLISIS DE CAUSA RAIZ. Problemática del sistema de enfriamiento de la Unidad de Balance. Barrancabermeja, Abril, 2008.

Cuadro 70. Retiro de calor en unidades de proceso.

RETIRO DE CALOR EN UNIDADES DE PROCESO (MBTU/H)	
DEMEX	426,6
VBII	39,4
UNIBON	70
UNIDADES AMBIENTALES	22,6
CRACKINGI	344,23
TOTAL	902,83

Fuente: Autor del proyecto.

Cuadro 71. Eficiencia de retiro de calor.

Remoción de calor en la torre (MBTU/H)	863,2
Calor generado en unidades (MBTU/H)	902,83
Eficiencia de retiro de calor	95,6%

Fuente: Autor del proyecto.

Los resultados enunciados en el cuadro 71 indican que de acuerdo a las condiciones actuales de operación la torre enfriadora no es capaz de retirar todo el calor ganado por la operación de las unidades de proceso; solo se retira el 95,6% de la energía.

La Purga intermitente (caliente) es abierta continuamente para el control de especies químicas y adicionalmente para el retiro de calor, la energía retirada por la purga se estima en 39,7 MBTU/H.

La remoción de calor (eficiencia térmica) De cada una de las celdas en las condiciones actuales indica que las celdas A; B y C están muy por encima en 143 MBTU/H VS 123 MBTU/H según diseño, debido principalmente al alto flujo de agua de recirculación que manejan.

La aproximación hallada es 10,14 °F, aunque incrementemos el flujo de aire por cada una de las celdas este valor no va a mejorar porque el calor a disipar es de 902,83 MBTU/H; con siete celdas se tiene la capacidad instalada de retirar calor en 861 MBTU/H con un L/G de diseño de 0,94.

3.11 CURVA CARACTERÍSTICA DE LAS CONDICIONES DE DISEÑO STE-2945.

3.11.1 CÁLCULO DE LA CONSTANTE DE LA CURVA DE DISEÑO DE LA STE-2945.

$$\text{Constante de la curva de diseño} = \frac{Kav/L}{(L/G)^{-0,6}}$$

$$\text{Constante de la curva de diseño} = \frac{1,560}{(0,940)^{-0,6}} = 1,503$$

En la gráfica 72 se simulan diferentes valores de L/G y se relaciona con la constante de diseño para obtener el Kav/L en la curva de diseño.

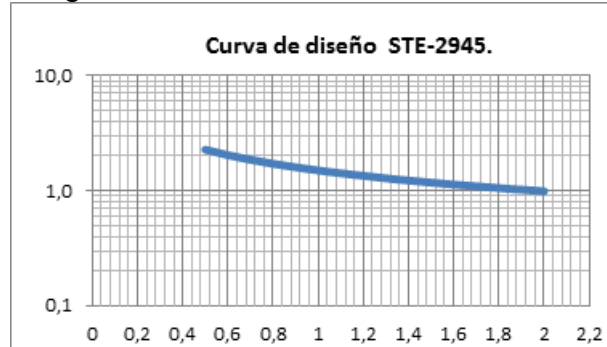
Cuadro 72. Cálculo de la constante de la curva de Diseño.

L/G	Kav/L
0,5	2,278
0,6	2,042
0,7	1,862
0,8	1,718
0,9	1,601
0,940	1,560
1	1,503
1,1	1,420
1,3	1,284
1,4	1,228
L/G	Kav/L
1,5	1,179
1,6	1,134
1,8	1,056
1,9	1,023
2	0,992

Fuente: Autor del proyecto.

La figura 19 evidencia que a valores incrementales del L/G consecuentemente el valor de coeficiente Kav/L se reduce; en otras palabras a medida que el agua de recirculación en las celdas se incrementa sin sobrepasar el diseño se logra mejores resultados en la transferencia térmica e incrementa la fuerza impulsora.

Figura 19. Curva de diseño STE-2945.



Fuente: Autor del proyecto.

3.11.2 CÁLCULO DE LA CURVA CARACTERÍSTICA DE LA STE-2945

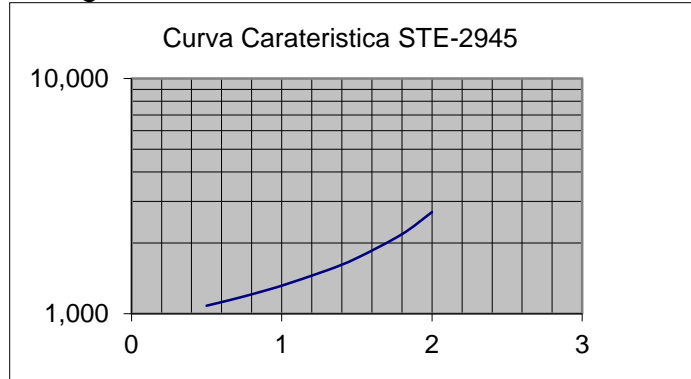
Para obtener la curva característica de la torre enfriadora es necesario hallar la fuerza impulsora y relacionarla con el rango simulando diferentes valores de L/G.

Cuadro 73. Determinación del KaV/L de la STE-2945.

L/G	ha (A)	ha (B)	ha (C)	ha (D)	ΔA	ΔB	ΔC	ΔD	A	B	C	D	A+B+C	ΔT	KaV/L
0,50	46,55	50,90	53,80	58,15	15,45	26,43	35,73	53,81	0,06	0,04	0,03	0,02	0,15	29,00	1,08
0,60	46,84	52,06	55,54	60,76	15,16	25,27	33,99	51,20	0,07	0,04	0,03	0,02	0,15	29,00	1,12
0,70	47,13	53,22	57,28	63,37	14,87	24,11	32,25	48,59	0,07	0,04	0,03	0,02	0,16	29,00	1,16
0,75	47,27	53,77	58,10	64,60	14,74	23,56	31,44	47,36	0,07	0,04	0,03	0,02	0,16	29,00	1,18
0,80	47,42	54,38	59,02	65,98	14,58	22,95	30,51	45,98	0,07	0,04	0,03	0,02	0,17	29,00	1,21
0,90	47,71	55,54	60,76	68,59	14,29	21,79	28,77	43,37	0,07	0,05	0,03	0,02	0,17	29,00	1,26
0,94	47,83	56,01	61,46	69,64	14,18	21,32	28,08	42,32	0,07	0,05	0,04	0,02	0,18	29,00	1,28
1,00	48,00	56,70	62,50	71,20	14,00	20,63	27,03	40,76	0,07	0,05	0,04	0,02	0,18	29,00	1,32
1,30	48,87	60,18	67,72	79,03	13,13	17,15	21,81	32,93	0,08	0,06	0,05	0,03	0,21	29,00	1,53
1,50	49,45	62,50	71,20	84,25	12,55	14,83	18,33	27,71	0,08	0,07	0,05	0,04	0,24	29,00	1,72
1,80	50,32	65,98	76,42	92,08	11,68	11,35	13,11	19,88	0,09	0,09	0,08	0,05	0,30	29,00	2,18
2,00	50,90	68,30	79,90	97,30	11,10	9,03	9,63	14,66	0,09	0,11	0,10	0,07	0,37	29,00	2,70

Fuente: Autor del proyecto.

Figura 20. Curva Característica STE-2945.



Fuente: Autor del proyecto.

La figura 20 evidencia que a valores incrementales del L/G consecuentemente el valor de coeficiente KaV/L también se incrementa; en otras palabras a medida que el agua de recirculación en las celdas se incrementa se presentan limitaciones en la operación, altos valores de KaV/L indican que el área efectiva de intercambio se reduce, porque la aproximación se incrementa saliendo el agua más caliente de la torre enfriadora.

3.11.3 Curva De Operación De La Torre Enfriadora. En el cuadro 74 se obtiene la constante de la curva de operación de la torre bajo las condiciones operacionales actuales.

$$\text{Constante de la curva de operación} = \frac{1,192}{(0,747)^{-0,6}} = 1,001$$

Cuadro 74. Cálculos curva de operación STE-2945.

CÁLCULOS CURVA DE OPERACIÓN.	
L/G	0,747
KaV/L	1,192
constante de la curva de operación	1,001

Fuente: Autor del proyecto.

En la cuadro 75 se simulan diferentes valores de L/G, y se relaciona con la constante operacional para obtener el Kav/L en la curva de operación.

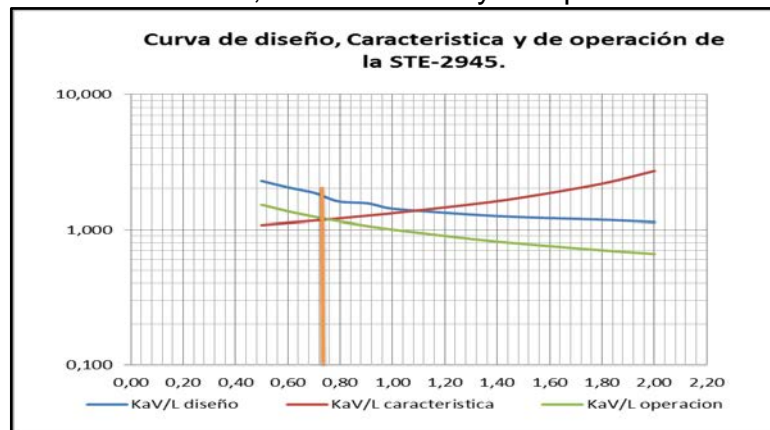
Cuadro 75. Relación del L/G con el coeficiente de transferencia STE-2945.

L/G	Kav/L
	Operación
0,50	1,517
0,60	1,360
0,70	1,240
0,75	1,192
0,80	1,144
0,90	1,066
0,94	1,039
1,00	1,001
1,30	0,855
1,50	0,785
1,80	0,704
2,00	0,660

Fuente: Autor del proyecto.

En la figura 21 se relacionan los coeficientes obtenidos en la curvas de diseño, característica y operacional de la torre el resultado esperado es la intercepción entre las curvas de operación y característica para determinar la eficiencia térmica real de la torre enfriadora, este valor está muy relacionado con el obtenido en el modelo matemático que relaciona el L/G obtenido y el L/G de diseño igualmente referenciado en el cuadro 76.

Figura 21. Curva de diseño, Característica y de operación de la STE-2945.



Fuente: Autor del proyecto.

Cuadro 76: Eficiencia de la STE-2945.

EFICIENCIA DE LASTE-2945	
L/G Diseño	0,940
L/G Intersección	0,750
Eficiencia de la celda	79,79%

Fuente: Autor del proyecto.

Los resultados tomados en campo y las simulaciones realizadas indican que la torre enfriadora STE-2945 presenta deficiencias en la transferencia térmica debida principalmente a problemas hidráulicos evidenciados en:

1. Presenta una eficiencia térmica global del 79,79%, mucho menor de lo esperado (90%).
2. Alto flujo de agua de retorno con 8516 gpm en promedio por celda; el caudal que maneja la torre es del 111% del flujo de diseño.
3. El grado de inclinación de las aspas es de 10,3° en promedio para las celdas que operan consecucionalmente la potencia utilizada en promedio es de 195 amperios versus los 265 de diseño, la potencia utilizada es del 73%, el rendimiento esperado por este tipo de ventiladores de tiro inducido es mayor al 80%.
4. La baja relación de L/G se explica principalmente por el alto volumen de agua y el bajo flujo de aire que maneja la torre enfriadora.
5. La aproximación es de 10,14 °F evidenciando baja transferencia térmica y eliminación de calor, se recomiendan valores típicos de 5 a 7°F máximo.
6. La diferencial de remoción del calor es de 29 °F si bien es cierto es alta esta se mejoraría si el flujo de entrada a la torre no estuviera por encima del diseño.
7. Alta presión de retorno en 15 psig lo que genera sobre presión en las boquillas de aspersion y canalización del flujo por los tubos de alivio de los rociadores, consecucionalmente reducen el tiempo de vida de los rociadores.

3.12 CÁLCULO DE LA CURVA CARACTERÍSTICA DE LA CELDA A.

Para obtener la curva característica de la celda es necesario hallar la fuerza impulsora y relacionarla con el rango simulando diferentes valores de L/G.

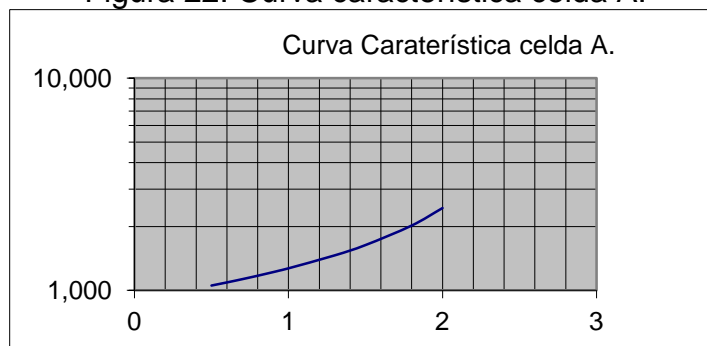
Cuadro 77. Determinación del KaV/L de la celda A.

L/G	ha (A)	ha (B)	ha (C)	ha (D)	ΔA	ΔB	ΔC	ΔD	A	B	C	D	A+B+C	ΔT	KaV/L
0,50	44,85	49,30	52,27	56,72	15,85	28,43	38,05	56,83	0,06	0,04	0,03	0,02	0,14	29,67	1,054
0,60	45,15	50,49	54,05	59,39	15,55	27,24	36,27	54,16	0,06	0,04	0,03	0,02	0,15	29,67	1,091
0,70	45,45	51,68	55,83	62,06	15,25	26,05	34,49	51,49	0,07	0,04	0,03	0,02	0,15	29,67	1,130
0,79	45,72	52,77	57,48	64,53	14,98	24,96	32,84	49,02	0,07	0,04	0,03	0,02	0,16	29,67	1,169
0,80	45,74	52,86	57,61	64,73	14,96	24,87	32,71	48,82	0,07	0,04	0,03	0,02	0,16	29,67	1,173
0,90	46,04	54,05	59,39	67,40	14,66	23,68	30,93	46,15	0,07	0,04	0,03	0,02	0,16	29,67	1,220
0,94	46,16	54,52	60,10	68,47	14,54	23,21	30,22	45,08	0,07	0,04	0,03	0,02	0,17	29,67	1,240
1,00	46,34	55,24	61,17	70,07	14,36	22,49	29,15	43,48	0,07	0,04	0,03	0,02	0,17	29,67	1,271
1,30	47,23	58,80	66,51	78,08	13,47	18,93	23,81	35,47	0,07	0,05	0,04	0,03	0,20	29,67	1,463
1,50	47,82	61,17	70,07	83,42	12,88	16,56	20,25	30,13	0,08	0,06	0,05	0,03	0,22	29,67	1,636
1,80	48,71	64,73	75,41	91,43	11,99	13,00	14,91	22,12	0,08	0,08	0,07	0,05	0,27	29,67	2,022
2,00	49,30	67,10	78,97	96,77	11,40	10,63	11,35	16,78	0,09	0,09	0,09	0,06	0,33	29,67	2,444

Fuente: Autor del proyecto.

La figura 22 evidencia que a valores incrementales del L/G consecucionalmente el valor de coeficiente KaV/L también se incrementa; en otras palabras a medida que el agua de recirculación en la celda se incrementa se presentan limitaciones en la operación, altos valores de KaV/L indican que el área efectiva de intercambio se reduce, porque la aproximación se incrementa saliendo el agua más caliente de la torre enfriadora.

Figura 22. Curva característica celda A.



Fuente: Autor del proyecto.

En la cuadro 78 se obtiene la constante de la curva de operación de la torre bajo las condiciones operacionales actuales.

$$\text{Constante de la curva de operación} = \frac{1,169}{(0,792)^{-0,6}} = 1,017$$

Cuadro 78. Cálculos curva de operación de la celda A.

CÁLCULOS CURVA DE OPERACIÓN.	
Valor de L/G	0,792
Valor de KaV/L	1,169
constante de la curva de operación	1,017

Fuente: Autor del proyecto.

En la cuadro 79 se simulan diferentes valores de L/G, y se relaciona con la constante operacional para obtener el KaV/L en la curva de operación.

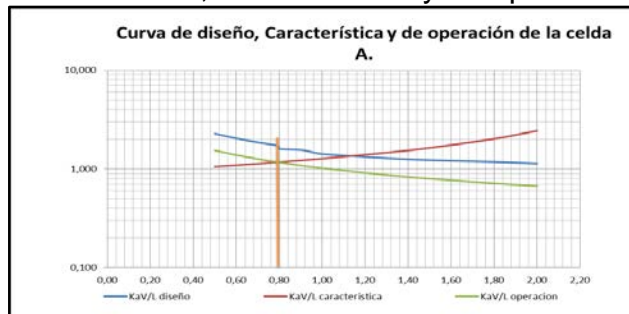
Cuadro 79. Relación del L/G con el coeficiente de transferencia para la celda A.

L/G	KaV/L.
	Operación
0,50	1,542
0,60	1,382
0,70	1,260
0,79	1,169
0,80	1,163
0,90	1,083
0,94	1,056
1,00	1,017
1,30	0,869
1,50	0,797
1,80	0,715
2,00	0,671

Fuente: Autor del proyecto.

En la figura 23 se relacionan los coeficientes obtenidos en la curvas de diseño, característica y operacional de la torre el resultado esperado es la intercepción entre las curvas de operación y característica para determinar la eficiencia térmica real de la torre enfriadora, este valor está muy relacionado con el obtenido en el modelo matemático que relaciona el L/G obtenido y el L/G de diseño igualmente referenciado en el cuadro 80.

Figura 23. Curva de diseño, Característica y de operación de la celda A.



Fuente: Autor del proyecto.

Cuadro 80. Eficiencia de la celda A.

EFICIENCIA DE LA CELDA A.	
L/G DISEÑO	0,940
L/G intersección	0,800
Eficiencia de la celda	85,11%

Fuente: Autor del proyecto.

Los resultados tomados en campo y las simulaciones realizadas indican que la celda "A" presenta una eficiencia térmica del 85,11 % debido principalmente a:

1. Alto flujo de agua de retorno con 9935 gpm en promedio; el caudal que maneja esta celda es 129% del flujo de diseño
2. El grado de inclinación de las aspas es de 9.4° lo que genera una baja potencia de operación del ventilador de tiro inducido con 192 amp, consecuentemente bajo flujo de aire y baja eficiencia en la celda.
3. Bajo L/G se explica principalmente por el alto volumen de agua y el bajo flujo de aire que maneja la celda.
4. La aproximación es de 11,6 °F evidenciando baja transferencia térmica y eliminación de calor por la celda se recomiendan valores típicos de 5 a 7°F máximo.
5. La diferencial de remoción del calor es de 29 °F si bien es cierto es alta esta se mejoraría si el flujo de entrada a la torre no estuviera por encima del diseño.
6. Alta presión de retorno con un promedio en 14,5 psig lo que genera sobre presión sobre líneas, distribuidores y boquillas adicional a canalización de flujos, consecuentemente reducen el tiempo de vida de los rociadores.

3.13 CÁLCULO DE LA CURVA CARACTERÍSTICA DE LA CELDA B.

Para obtener la curva característica de la celda es necesario hallar la fuerza impulsora y relacionarla con el rango simulando diferentes valores de L/G.

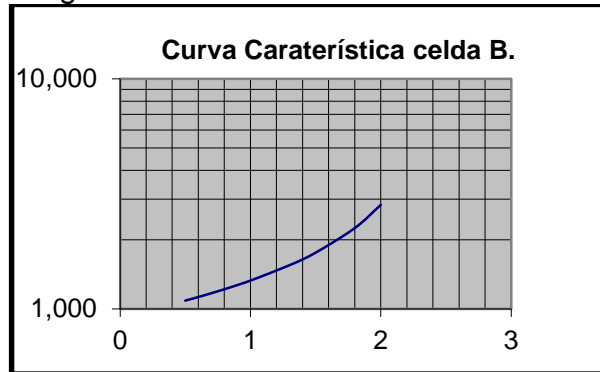
Cuadro 81. Determinación del KaV/L de la celda B.

L/G	ha (A)	ha (B)	ha (C)	ha (D)	ΔA	ΔB	ΔC	ΔD	A	B	C	D	A+B+C	ΔT	KaV/L
0,50	44,84	49,24	52,17	56,57	15,82	26,32	35,44	53,21	0,06	0,04	0,03	0,02	0,15	29,33	1,087
0,60	45,13	50,41	53,93	59,21	15,53	25,15	33,68	50,57	0,06	0,04	0,03	0,02	0,15	29,33	1,127
0,70	45,42	51,58	55,69	61,85	15,23	23,98	31,92	47,93	0,07	0,04	0,03	0,02	0,16	29,33	1,170
0,80	45,71	52,71	57,38	64,39	14,95	22,85	30,23	45,40	0,07	0,04	0,03	0,02	0,17	29,33	1,216
0,80	45,72	52,76	57,45	64,49	14,94	22,80	30,16	45,29	0,07	0,04	0,03	0,02	0,17	29,33	1,218
0,90	46,01	53,93	59,21	67,13	14,65	21,63	28,40	42,65	0,07	0,05	0,04	0,02	0,17	29,33	1,270
0,94	46,13	54,40	59,91	68,19	14,53	21,16	27,69	41,60	0,07	0,05	0,04	0,02	0,18	29,33	1,292
1,00	46,30	55,10	60,97	69,77	14,35	20,46	26,64	40,01	0,07	0,05	0,04	0,02	0,18	29,33	1,328
1,30	47,18	58,62	66,25	77,69	13,47	16,94	21,36	32,09	0,07	0,06	0,05	0,03	0,21	29,33	1,549
1,50	47,77	60,97	69,77	82,97	12,89	14,59	17,84	26,81	0,08	0,07	0,06	0,04	0,24	29,33	1,756
1,80	48,65	64,49	75,05	90,89	12,01	11,07	12,56	18,89	0,08	0,09	0,08	0,05	0,31	29,33	2,245
2,00	49,24	66,84	78,57	96,17	11,42	8,72	9,04	13,61	0,09	0,11	0,11	0,07	0,39	29,33	2,833

Fuente: Autor del proyecto.

La figura 24 evidencia que a valores incrementales del L/G consecucionalmente el valor de coeficiente KaV/L también se incrementa; en otras palabras a medida que el agua de recirculación en la celda se incrementa se presentan limitaciones en la operación, altos valores de KaV/L indican que el área efectiva de intercambio se reduce, porque la aproximación se incrementa saliendo el agua más caliente de la torre enfriadora.

Figura 24. Curva característica celda B.



Fuente: Autor del proyecto.

En la cuadro 82 se obtiene la constante de la curva de operación de la torre bajo las condiciones operacionales actuales.

$$\text{Constante de la curva de operación} = \frac{1,216}{(0,796)^{-0,6}} = 1,060$$

Cuadro 82: Cálculos curva de operación de la celda B.

CÁLCULOS CURVA DE OPERACIÓN.	
L/G	0,796
KaV/L	1,216
constante de la curva de operación	1,060

Fuente: Autor del proyecto.

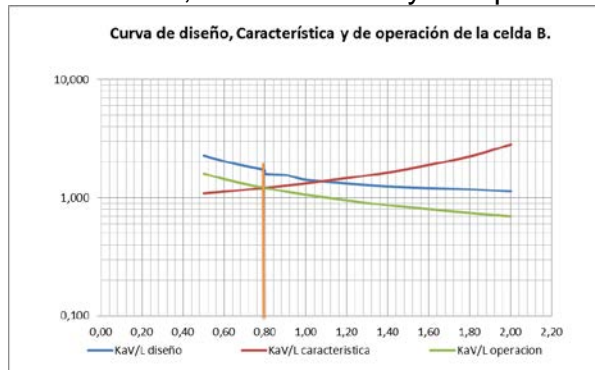
Cuadro 83. Relación del L/G con el coeficiente de transferencia para la celda B.

L/G	KaV/L.
	Operación
0,50	1,607
0,60	1,440
0,70	1,313
0,80	1,216
0,80	1,212
0,90	1,129
0,94	1,100
1,00	1,060
1,30	0,906
1,50	0,831
1,80	0,745
2,00	0,699

Fuente: Autor del proyecto.

En la figura 25 se relacionan los coeficientes obtenidos en la curvas de diseño, característica y operacional de la torre el resultado esperado es la intercepción entre las curvas de operación y característica para determinar la eficiencia térmica real de la torre enfriadora, este valor está muy relacionado con el obtenido en el modelo matemático que relaciona el L/G obtenido y el L/G de diseño igualmente referenciado en el cuadro 84.

Figura 25. Curva de diseño, Característica y de operación de la celda B.



Fuente: Autor del proyecto.

Cuadro 84. Eficiencia de la celda B.

EFICIENCIA DE LA CELDA.	
L/G Diseño	0,940
L/G Intersección	0,800
Eficiencia de la celda	85,11%

Fuente: Autor del proyecto.

Los resultados tomados en campo y las simulaciones realizadas indican que la celda "B" presenta una eficiencia térmica del 85,11 % debido principalmente a:

1. Alto flujo de agua de retorno con 9865 gpm en promedio; el caudal que maneja esta celda es 128,6% del flujo de diseño
2. El grado de inclinación de las aspas es de 9.4° lo que genera una baja potencia de operación del ventilador de tiro inducido con 188 amp, consecencialmente bajo flujo de aire y baja eficiencia en la torre enfriadora.
3. Bajo L/G se explica principalmente por el alto volumen de agua y el bajo flujo de aire que maneja la celda.
4. La aproximación es de 10,6 °F evidenciando baja transferencia térmica y eliminación de calor por la celda.
5. La diferencial de remoción del calor es de 29.3 °F si bien es cierto es alta esta se mejoraría si el flujo de entrada a la torre no estuviera por encima del diseño.
6. Alta presión de retorno en 15 psig lo que genera sobre presión en las boquillas de aspersión y canalización del flujo por los tubos de alivio de los rociadores, consecencialmente reducen el tiempo de vida de los rociadores.

3.14 CÁLCULO DE LA CURVA CARACTERÍSTICA DE LA CELDA C.

Para obtener la curva característica de la celda es necesario hallar la fuerza impulsora y relacionarla con el rango simulando diferentes valores de L/G.

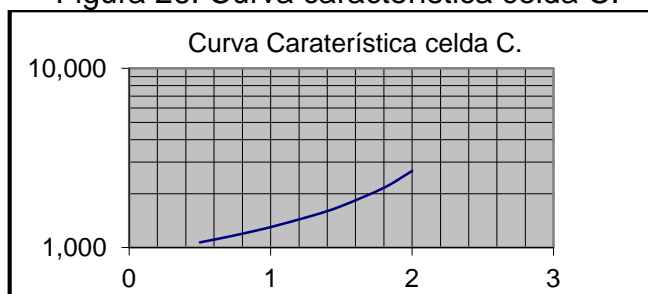
Cuadro 85. Determinación del KaV/L de la celda C.

L/G	ha (A)	ha (B)	ha (C)	ha (D)	ΔA	ΔB	ΔC	ΔD	A	B	C	D	A+B+C	ΔT	KaV/L
0,50	44,78	49,33	52,36	56,91	16,53	27,63	37,37	56,46	0,06	0,04	0,03	0,02	0,14	30,33	1,0703
0,60	45,08	50,54	54,18	59,64	16,23	26,42	35,55	53,73	0,06	0,04	0,03	0,02	0,15	30,33	1,1087
0,70	45,38	51,75	56,00	62,37	15,93	25,21	33,73	51,00	0,06	0,04	0,03	0,02	0,15	30,33	1,1505
0,80	45,67	52,91	57,74	64,98	15,64	24,05	31,99	48,39	0,06	0,04	0,03	0,02	0,16	30,33	1,1940
0,80	45,69	52,97	57,82	65,10	15,62	23,99	31,91	48,27	0,06	0,04	0,03	0,02	0,16	30,33	1,1962
0,90	45,99	54,18	59,64	67,83	15,32	22,78	30,09	45,54	0,07	0,04	0,03	0,02	0,16	30,33	1,2464
0,94	46,11	54,67	60,37	68,92	15,20	22,29	29,36	44,45	0,07	0,04	0,03	0,02	0,17	30,33	1,2680
1,00	46,29	55,39	61,46	70,56	15,02	21,57	28,27	42,81	0,07	0,05	0,04	0,02	0,17	30,33	1,3020
1,30	47,20	59,03	66,92	78,75	14,11	17,93	22,81	34,62	0,07	0,06	0,04	0,03	0,20	30,33	1,5121
1,50	47,81	61,46	70,56	84,21	13,50	15,50	19,17	29,16	0,07	0,06	0,05	0,03	0,23	30,33	1,7066
1,80	48,72	65,10	76,02	92,40	12,59	11,86	13,71	20,97	0,08	0,08	0,07	0,05	0,28	30,33	2,1564
2,00	49,33	67,53	79,66	97,86	11,98	9,43	10,07	15,51	0,08	0,11	0,10	0,06	0,35	30,33	2,6786

Fuente: Autor del proyecto.

La figura 26 evidencia que a valores incrementales del L/G consecucionalmente el valor de coeficiente KaV/L también se incrementa; en otras palabras a medida que el agua de recirculación en la celda se incrementa se presentan limitaciones en la operación, altos valores de KaV/L indican que el área efectiva de intercambio se reduce, porque la aproximación se incrementa saliendo el agua más caliente de la torre enfriadora.

Figura 26. Curva característica celda C.



Fuente: Autor del proyecto.

$$\text{Constante de la curva de operación} = \frac{1,192}{(0,747)^{-0,6}} = 1,001$$

En la cuadro 86 se obtiene la constante de la curva de operación de la torre bajo las condiciones operacionales actuales.

Cuadro 86. Cálculos curva de operación de la celda C.

CÁLCULOS CURVA DE OPERACIÓN	
L/G	0,747
KaV/L	1,192
constante de la curva de operación	1,001

Fuente: Autor del proyecto.

En la cuadro 87 se simulan diferentes valores de L/G, y se relaciona con la constante operacional para obtener el K_{av}/L en la curva de operación.

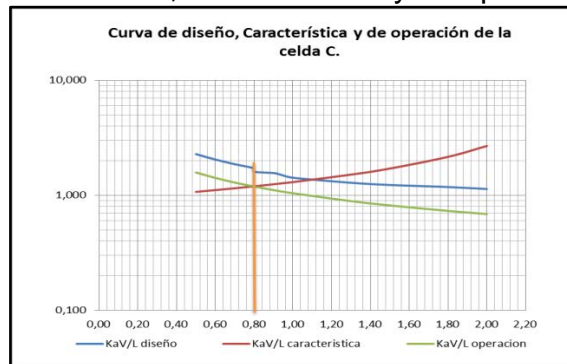
Cuadro 87. Relación del L/G con el coeficiente de transferencia para la celda C.

L/G	Kav/L
	Operación
0,50	1,578
0,60	1,414
0,70	1,289
0,80	1,194
0,80	1,190
0,90	1,109
0,94	1,080
1,00	1,041
1,30	0,889
1,50	0,816
1,80	0,732
2,00	0,687

Fuente: Autor del proyecto.

En la figura 27 se relacionan los coeficientes obtenidos en la curvas de diseño, característica y operacional de la torre el resultado esperado es la intercepción entre las curvas de operación y característica para determinar la eficiencia térmica real de la torre enfriadora, este valor está muy relacionado con el obtenido en el modelo matemático que relaciona el L/G obtenido y el L/G de diseño igualmente referenciado en el cuadro 88.

Figura 27. Curva de diseño, Característica y de operación de la celda C.



Fuente: Autor del proyecto.

Cuadro 88. Eficiencia de la celda C.

EFICIENCIA DE LA CELDA	
L/G Diseño	0,940
L/G Intersección	0,800
Eficiencia de la celda	85,11%

Fuente: Autor del proyecto.

Los resultados tomados en campo y las simulaciones realizadas indican que la celda “C” presenta una eficiencia térmica del 85,11 % debido principalmente a:

1. Alto flujo de agua de retorno con 9583 gpm en promedio; el caudal que maneja esta celda es 125% del flujo de diseño.
2. El grado de inclinación de las aspas es de 9.3° lo que genera una baja potencia de operación del ventilador de tiro inducido con 195 amp, consecuentemente bajo flujo de aire y baja eficiencia en la celda.
3. Bajo L/G se explica principalmente por el alto volumen de agua y el bajo flujo de aire que maneja la celda.
4. La aproximación es de 11,0 °F evidenciando baja transferencia térmica y eliminación de calor por la celda.
5. La diferencial de remoción del calor es de 30.3 °F si bien es cierto es alta esta se mejoraría si el flujo de entrada a la torre no estuviera por encima del diseño.
6. Alta presión de retorno en 15 psig lo que genera sobre presión en las boquillas de aspersión y canalización del flujo por los tubos de alivio de los rociadores, consecuentemente reducen el tiempo de vida de los rociadores.

3.15 CÁLCULO DE LA CURVA CARACTERÍSTICA DE LA CELDA F.

Para obtener la curva característica de la celda es necesario hallar la fuerza impulsora y relacionarla con el rango simulando diferentes valores de L/G.

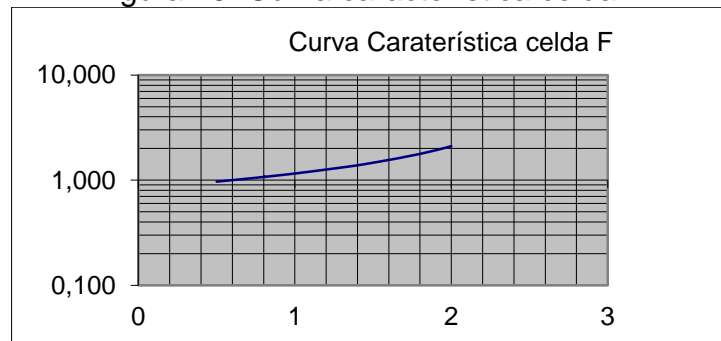
Cuadro 89. Determinación del KaV/L de la celda F.

L/G	ha (A)	ha (B)	ha (C)	ha (D)	ΔA	ΔB	ΔC	ΔD	A	B	C	D	A+B+C	ΔT	KaV/L
0,50	49,73	53,73	56,40	60,40	16,28	26,93	35,94	53,06	0,06	0,04	0,03	0,02	0,15	26,67	0,968
0,60	50,00	54,80	58,00	62,80	16,01	25,86	34,34	50,66	0,06	0,04	0,03	0,02	0,15	26,67	1,000
0,70	50,27	55,87	59,60	65,20	15,75	24,79	32,74	48,26	0,06	0,04	0,03	0,02	0,16	26,67	1,034
0,81	50,56	57,02	61,34	67,80	15,46	23,64	31,00	45,66	0,06	0,04	0,03	0,02	0,16	26,67	1,074
0,80	50,53	56,93	61,20	67,60	15,48	23,73	31,14	45,86	0,06	0,04	0,03	0,02	0,16	26,67	1,071
0,90	50,80	58,00	62,80	70,00	15,21	22,66	29,54	43,46	0,07	0,04	0,03	0,02	0,17	26,67	1,112
0,94	50,91	58,43	63,44	70,96	15,11	22,23	28,90	42,50	0,07	0,04	0,03	0,02	0,17	26,67	1,129
1,00	51,07	59,07	64,40	72,40	14,95	21,59	27,94	41,06	0,07	0,05	0,04	0,02	0,17	26,67	1,156
1,30	51,87	62,27	69,20	79,60	14,15	18,39	23,14	33,86	0,07	0,05	0,04	0,03	0,20	26,67	1,319
1,50	52,40	64,40	72,40	84,40	13,61	16,26	19,94	29,06	0,07	0,06	0,05	0,03	0,22	26,67	1,464
1,80	53,20	67,60	77,20	91,60	12,81	13,06	15,14	21,86	0,08	0,08	0,07	0,05	0,27	26,67	1,776
2,00	53,73	69,73	80,40	96,40	12,28	10,93	11,94	17,06	0,08	0,09	0,08	0,06	0,32	26,67	2,102

Fuente: Autor del proyecto.

La figura 28 evidencia que a valores incrementales del L/G consecucionalmente el valor de coeficiente KaV/L también se incrementa; en otras palabras a medida que el agua de recirculación en la celda se incrementa se presentan limitaciones en la operación, altos valores de KaV/L indican que el área efectiva de intercambio se reduce, porque la aproximación se incrementa saliendo el agua más caliente de la torre enfriadora.

Figura 28. Curva característica celda F.



Fuente: Autor del proyecto.

La curva característica permite determinar gráficamente el valor de L/G y consecucionalmente determinar la eficiencia de la celda de la torre enfriadora.

En la cuadro 90 se obtiene la constante de la curva de operación de la torre bajo las condiciones operacionales actuales.

$$\text{Constante de la curva de operación} = \frac{1,074}{(0,809)^{-0,6}} = 0,946$$

Cuadro 90. Cálculos curva de operación de la celda F.

CÁLCULOS CURVA DE OPERACIÓN	
L/G	0,809
KaV/L	1,074
constante de la curva de operación	0,946

Fuente: Autor del proyecto.

La curva de operación permite establecer los parámetros en los cuales opera la torre enfriadora y está muy relacionada con la curva de diseño de la torre enfriadora.

En la cuadro 91 se simulan diferentes valores de L/G, y se relaciona con la constante operacional para obtener el Kav/L en la curva de operación.

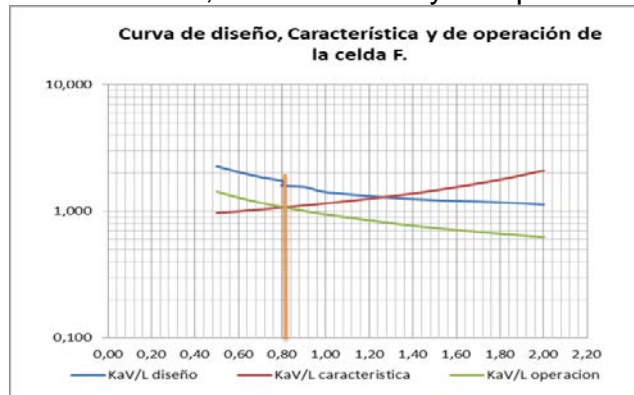
Cuadro 91. Relación del L/G con el coeficiente de transferencia para la celda F.

L/G	Kav/L
	Operación
0,50	1,434
0,60	1,285
0,70	1,171
0,81	1,074
0,80	1,081
0,90	1,007
0,94	0,982
1,00	0,946
1,30	0,808
1,50	0,742
1,80	0,665
2,00	0,624

Fuente: Autor del proyecto.

En la figura 29 se relacionan los coeficientes obtenidos en las curvas de diseño, característica y operacional de la torre el resultado esperado es la intersección entre las curvas de operación y característica para determinar la eficiencia térmica real de la torre enfriadora, este valor está muy relacionado con el obtenido en el modelo matemático que relaciona el L/G obtenido y el L/G de diseño igualmente referenciado en el cuadro 92.

Figura 29. Curva de diseño, Característica y de operación de la celda F.



Fuente: Autor del proyecto.

Cuadro 92. Eficiencia de la celda F.

EFICIENCIA DE LA CELDA	
L/G Diseño	0,940
L/G Intersección	0,810
Eficiencia de la celda	86,17%

Fuente: Autor del proyecto.

Los resultados tomados en campo y las simulaciones realizadas indican que la celda “F” presenta una eficiencia térmica del 86,1 % debido principalmente a:

1. El grado de inclinación de las aspas es de 11,6° con una potencia de operación del ventilador de tiro inducido de 207 amperios, el ventilador de esta celda junto con la celda G operan a mayor potencia lo que mejora la remoción de calor.
2. La aproximación es de 9,8 °F evidenciando baja transferencia térmica y eliminación de calor por la celda, aunque se observa un mejor comportamiento en esta celda el valor de aproximación sigue siendo muy alto.
3. La diferencial de remoción del calor es de 26,7 °F es bajo debido principalmente al estado de deterioro de los internos en el sistema de distribución.
4. Alta presión de retorno en 14,5 psig lo que genera sobre presión y canalización del flujo al interior del relleno y congestión en el atrapa neblinas.

3.16 CÁLCULO DE LA CURVA CARACTERÍSTICA DE LA CELDA G.

Para obtener la curva característica de la celda es necesario hallar la fuerza impulsora y relacionarla con el rango simulando diferentes valores de L/G.

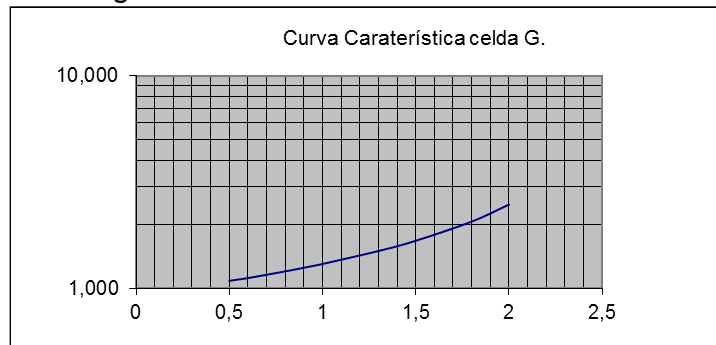
Cuadro 93. Determinación del KaV/L de la celda G.

L/G	ha (A)	ha (B)	ha (C)	ha (D)	ΔA	ΔB	ΔC	ΔD	A	B	C	D	A+B+C	ΔT	KaV/L
0,50	47,91	52,26	55,16	59,51	15,25	26,26	35,78	54,24	0,07	0,04	0,03	0,02	0,15	29,00	1,088
0,60	50,00	54,80	58,00	62,80	13,16	23,72	32,94	50,95	0,08	0,04	0,03	0,02	0,17	26,67	1,121
0,70	50,27	55,87	59,60	65,20	12,89	22,65	31,34	48,55	0,08	0,04	0,03	0,02	0,17	26,67	1,161
0,58	49,95	54,60	57,70	62,35	13,21	23,92	33,24	51,40	0,08	0,04	0,03	0,02	0,17	26,67	1,114
0,80	50,53	56,93	61,20	67,60	12,63	21,59	29,74	46,15	0,08	0,05	0,03	0,02	0,18	26,67	1,205
0,90	50,80	58,00	62,80	70,00	12,36	20,52	28,14	43,75	0,08	0,05	0,04	0,02	0,19	26,67	1,254
0,94	50,91	58,43	63,44	70,96	12,25	20,09	27,50	42,79	0,08	0,05	0,04	0,02	0,19	26,67	1,274
1,00	51,07	59,07	64,40	72,40	12,09	19,45	26,54	41,35	0,08	0,05	0,04	0,02	0,20	26,67	1,306
1,30	51,87	62,27	69,20	79,60	11,29	16,25	21,74	34,15	0,09	0,06	0,05	0,03	0,23	26,67	1,502
1,50	52,40	64,40	72,40	84,40	10,76	14,12	18,54	29,35	0,09	0,07	0,05	0,03	0,25	26,67	1,678
1,80	53,20	67,60	77,20	91,60	9,96	10,92	13,74	22,15	0,10	0,09	0,07	0,05	0,31	26,67	2,066
2,00	53,73	69,73	80,40	96,40	9,43	8,79	10,54	17,35	0,11	0,11	0,09	0,06	0,37	26,67	2,483

Fuente: Autor del proyecto.

La figura 30 evidencia que a valores incrementales del L/G consecucionalmente el valor de coeficiente KaV/L también se incrementa; en otras palabras a medida que el agua de recirculación en la celda se incrementa se presentan limitaciones en la operación, altos valores de KaV/L indican que el área efectiva de intercambio se reduce, porque la aproximación se incrementa saliendo el agua más caliente de la torre enfriadora.

Figura 30. Curva característica celda G.



Fuente: Autor del proyecto.

La curva característica permite determinar gráficamente el valor de L/G y consecucionalmente determinar la eficiencia de la celda de la torre enfriadora.

En la cuadro 94 se obtiene la constante de la curva de operación de la torre bajo las condiciones operacionales actuales.

$$\text{Constante de la curva de operación} = \frac{1,119}{(0,581)^{-0,6}} = 0,808$$

Cuadro 94. Cálculos curva de operación de la celda G.

CÁLCULOS CURVA DE OPERACIÓN	
Valor de L/G	0,581
Valor de KaV/L	1,119
constante de la curva de operación	0,808

Fuente: Autor del proyecto.

La curva de operación permite establecer los parámetros en los cuales opera la torre enfriadora y está muy relacionada con la curva de diseño de la torre enfriadora.

En la cuadro 95 se simulan diferentes valores de L/G, y se relaciona con la constante operacional para obtener el Kav/L en la curva de operación.

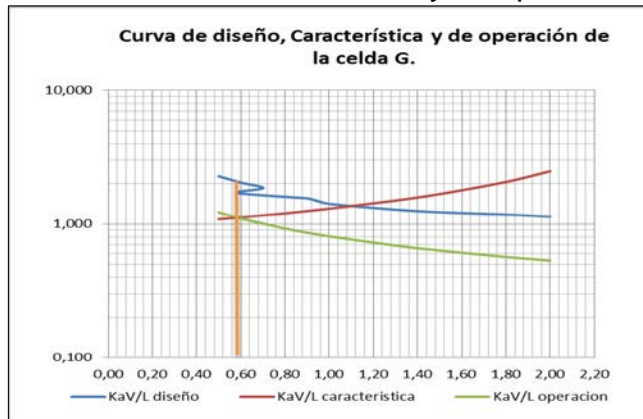
Cuadro 95. Relación del L/G con el coeficiente de transferencia para la celda G.

L/G	Kav/L
	Operación
0,50	1,225
0,60	1,098
0,70	1,001
0,58	1,119
0,80	0,924
0,90	0,861
0,94	0,839
1,00	0,808
1,30	0,691
1,50	0,634
1,80	0,568
2,00	0,533

Fuente: Autor del proyecto.

En la figura 31 se relacionan los coeficientes obtenidos en las curvas de diseño, característica y operacional de la torre el resultado esperado es la intersección entre las curvas de operación y característica para determinar la eficiencia térmica real de la torre enfriadora, este valor está muy relacionado con el obtenido en el modelo matemático que relaciona el L/G obtenido y el L/G de diseño igualmente referenciado en el cuadro 96.

Figura 31. Curva de diseño, Característica y de operación de la celda G.



Fuente: Autor del proyecto.

Cuadro 96. Eficiencia de la celda G.

EFICIENCIA DE LA CELDA	
L/G Diseño	0,940
L/G Intersección	0,580
Eficiencia de la celda	61,70%

Fuente: Autor del proyecto.

Los resultados tomados en campo y las simulaciones realizadas indican que la celda “G” presenta una eficiencia térmica del 61,7 % debido principalmente a:

1. El grado de inclinación de las aspas es de 11,6° con una potencia de operación del ventilador de tiro inducido de 205 amperios.
2. La aproximación es de 9,48 °F evidenciando baja transferencia térmica y eliminación de calor por la celda, es la celda que evidencia menor eficiencia en su operación.
3. La diferencial de remoción del calor es de 29 °F es bajo debido principalmente al estado de deterioro de los internos en el sistema de distribución.
4. Alta presión de retorno en 14,2 psig lo que genera sobre presión y canalización del flujo al interior del relleno y congestión en el atrapa neblinas.
5. La celda “G” opera al 61,85% y la “J” opera al 71,1 % de su flujo de diseño por tal razón estas celdas no deberían operar ya que el consumo energético es alto en comparación con el beneficio obtenido.

3.17 CÁLCULO DE LA CURVA CARACTERÍSTICA DE LA CELDA I.

Para obtener la curva característica de la celda es necesario hallar la fuerza impulsora y relacionarla con el rango simulando diferentes valores de L/G.

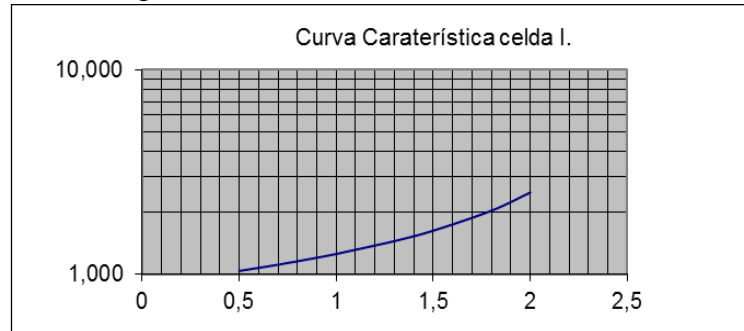
Cuadro 97. Determinación del KaV/L de la celda I.

L/G	ha (A)	ha (B)	ha (C)	ha (D)	ΔA	ΔB	ΔC	ΔD	A	B	C	D	A+B+C	ΔT	KaV/L
0,50	44,94	49,34	52,27	56,67	16,72	27,49	36,84	55,04	0,06	0,04	0,03	0,02	0,14	29,33	1,038
0,60	45,23	50,51	54,03	59,31	16,43	26,32	35,08	52,40	0,06	0,04	0,03	0,02	0,15	29,33	1,074
0,70	45,52	51,68	55,79	61,95	16,13	25,14	33,32	49,76	0,06	0,04	0,03	0,02	0,15	29,33	1,114
0,79	45,78	52,70	57,32	64,24	15,88	24,13	31,79	47,47	0,06	0,04	0,03	0,02	0,16	29,33	1,151
0,80	45,82	52,86	57,55	64,59	15,84	23,97	31,56	47,12	0,06	0,04	0,03	0,02	0,16	29,33	1,157
0,90	46,11	54,03	59,31	67,23	15,55	22,80	29,80	44,48	0,06	0,04	0,03	0,02	0,16	29,33	1,204
0,94	46,23	54,50	60,01	68,29	15,43	22,33	29,10	43,42	0,06	0,04	0,03	0,02	0,17	29,33	1,225
1,00	46,40	55,20	61,07	69,87	15,25	21,62	28,04	41,84	0,07	0,05	0,04	0,02	0,17	29,33	1,257
1,30	47,28	58,72	66,35	77,79	14,37	18,10	22,76	33,92	0,07	0,06	0,04	0,03	0,20	29,33	1,454
1,50	47,87	61,07	69,87	83,07	13,79	15,76	19,24	28,64	0,07	0,06	0,05	0,03	0,22	29,33	1,634
1,80	48,75	64,59	75,15	90,99	12,91	12,24	13,96	20,72	0,08	0,08	0,07	0,05	0,28	29,33	2,047
2,00	49,34	66,94	78,67	96,27	12,32	9,89	10,44	15,44	0,08	0,10	0,10	0,06	0,34	29,33	2,514

Fuente: Autor del proyecto.

La figura 32 evidencia que a valores incrementales del L/G consecucionalmente el valor de coeficiente KaV/L también se incrementa; en otras palabras a medida que el agua de recirculación en la celda se incrementa se presentan limitaciones en la operación, altos valores de KaV/L indican que el área efectiva de intercambio se reduce, porque la aproximación se incrementa saliendo el agua más caliente de la torre enfriadora.

Figura 32. Curva característica celda I.



Fuente: Autor del proyecto.

En la cuadro 98 se obtiene la constante de la curva de operación de la torre bajo las condiciones operacionales actuales.

$$\text{Constante de la curva de operación} = \frac{1,151}{(0,787)^{-0,6}} = 0,997$$

Cuadro 98. Cálculos curva de operación de la celda I.

CÁLCULOS CURVA DE OPERACIÓN	
L/G	0,787
KaV/L	1,151
constante de la curva de operación	0,997

Fuente: Autor del proyecto.

La curva de operación permite establecer los parámetros en los cuales opera la torre enfriadora y está muy relacionada con la curva de diseño de la torre enfriadora.

En la cuadro 99 se simulan diferentes valores de L/G, y se relaciona con la constante operacional para obtener el Kav/L en la curva de operación.

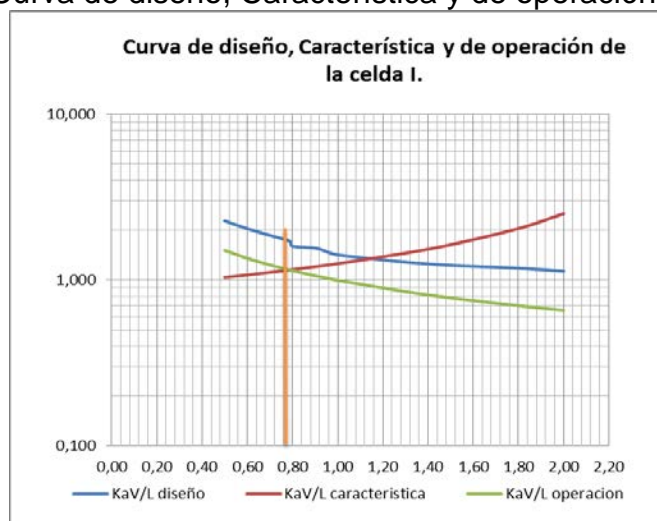
Cuadro 99. Relación del L/G con el coeficiente de transferencia para la celda I.

L/G	Kav/L
	Operación
0,50	1,511
0,60	1,354
0,70	1,235
0,79	1,151
0,80	1,140
0,90	1,062
0,94	1,034
1,00	0,997
1,30	0,852
1,50	0,781
1,80	0,701
2,00	0,658

Fuente: Autor del proyecto.

En la figura 33 se relacionan los coeficientes obtenidos en las curvas de diseño, característica y operacional de la torre el resultado esperado es la intersección entre las curvas de operación y característica para determinar la eficiencia térmica real de la torre enfriadora, este valor está muy relacionado con el obtenido en el modelo matemático que relaciona el L/G obtenido y el L/G de diseño igualmente referenciado en el cuadro 100.

Figura 33. Curva de diseño, Característica y de operación de la celda I.



Fuente: Autor del proyecto.

Cuadro 100. Eficiencia de la celda I.

EFICIENCIA DE LA CELDA	
L/G Diseño	0,940
L/G Intersección	0,780
Eficiencia de la celda	82,98%

Fuente: Autor del proyecto.

Los resultados tomados en campo y las simulaciones realizadas indican que la celda "I" presenta una eficiencia térmica del 82,98 % debido principalmente a:

1. El grado de inclinación de las aspas es de 9,9° con una potencia de operación del ventilador de tiro inducido de 189 amperios, razón por la cual esta celda opera a baja capacidad de remoción de calor.
2. La aproximación es de 11,2 °F evidenciando baja transferencia térmica y eliminación de calor por la celda.
3. La diferencial de remoción del calor es de 29,3 °F es bajo debido principalmente al estado de deterioro de los internos en el sistema de distribución.
4. Alta presión de retorno en 14,20 psig lo que genera sobre presión y canalización del flujo al interior del relleno y congestión en el atrapa neblinas.

3.18 CÁLCULO DE LA CURVA CARACTERÍSTICA DE LA CELDA J.

Para obtener la curva característica de la celda es necesario hallar la fuerza impulsora y relacionarla con el rango simulando diferentes valores de L/G.

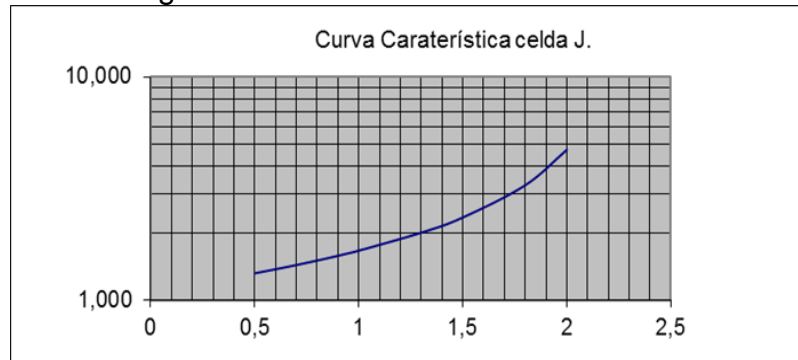
Cuadro 101. Determinación del KaV/L de la celda J.

L/G	ha (A)	ha (B)	ha (C)	ha (D)	ΔA	ΔB	ΔC	ΔD	A	B	C	D	A+B+C	ΔT	KaV/L
0,50	48,82	53,12	55,99	60,29	11,73	21,92	30,73	47,80	0,09	0,05	0,03	0,02	0,18	28,67	1,321
0,60	49,11	54,27	57,71	62,87	11,44	20,77	29,01	45,22	0,09	0,05	0,03	0,02	0,19	28,67	1,377
0,70	49,40	55,42	59,43	65,45	11,15	19,62	27,29	42,64	0,09	0,05	0,04	0,02	0,20	28,67	1,438
0,67	49,31	55,05	58,89	64,63	11,24	19,99	27,83	43,46	0,09	0,05	0,04	0,02	0,20	28,67	1,418
0,80	49,68	56,56	61,15	68,03	10,87	18,48	25,57	40,06	0,09	0,05	0,04	0,02	0,21	28,67	1,507
0,90	49,97	57,71	62,87	70,61	10,58	17,33	23,85	37,48	0,09	0,06	0,04	0,03	0,22	28,67	1,583
0,94	50,08	58,17	63,56	71,64	10,47	16,87	23,16	36,45	0,10	0,06	0,04	0,03	0,23	28,67	1,616
1,00	50,26	58,86	64,59	73,19	10,29	16,18	22,13	34,90	0,10	0,06	0,05	0,03	0,23	28,67	1,668
1,30	51,12	62,30	69,75	80,93	9,43	12,74	16,97	27,16	0,11	0,08	0,06	0,04	0,28	28,67	2,008
1,50	51,69	64,59	73,19	86,09	8,86	10,45	13,53	22,00	0,11	0,10	0,07	0,05	0,33	28,67	2,350
1,80	52,55	68,03	78,35	93,83	8,00	7,01	8,37	14,26	0,13	0,14	0,12	0,07	0,46	28,67	3,277
2,00	53,12	70,32	81,79	98,99	7,43	4,72	4,93	9,10	0,13	0,21	0,20	0,11	0,66	28,67	4,726

Fuente: Autor del proyecto.

La figura 34 evidencia que a valores incrementales del L/G consecucionalmente el valor de coeficiente KaV/L también se incrementa; en otras palabras a medida que el agua de recirculación en la celda se incrementa se presentan limitaciones en la operación, altos valores de KaV/L indican que el área efectiva de intercambio se reduce, porque la aproximación se incrementa saliendo el agua más caliente de la torre enfriadora.

Figura 34. Curva característica celda J.



Fuente: Autor del proyecto.

En la cuadro 102 se obtiene la constante de la curva de operación de la torre bajo las condiciones operacionales actuales.

$$\text{Constante de la curva de operación} = \frac{1,418}{(0,668)^{-0,6}} = 1,114$$

Cuadro 102. Cálculos curva de operación de la celda J.

CÁLCULOS CURVA DE OPERACIÓN	
L/G	0,668
KaV/L	1,418
constante de la curva de operación	1,114

Fuente: Autor del proyecto.

En la cuadro 103 se simulan diferentes valores de L/G, y se relaciona con la constante operacional para obtener el Kav/L en la curva de operación.

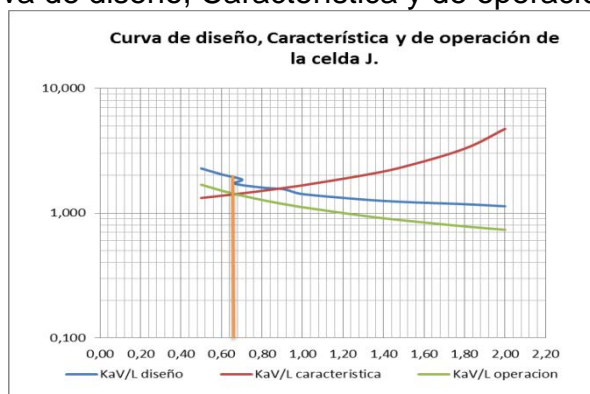
Cuadro 103. Relación del L/G con el coeficiente de transferencia para la celda J.

L/G	Kav/L
	Operación
0,50	1,688
0,60	1,513
0,70	1,380
0,67	1,418
0,80	1,273
0,90	1,186
0,94	1,156
1,00	1,114
1,30	0,952
1,50	0,873
1,80	0,783
2,00	0,735

Fuente: Autor del proyecto.

En la figura 35 se relacionan los coeficientes obtenidos en la curvas de diseño, característica y operacional de la torre el resultado esperado es la intercepción entre las curvas de operación y característica para determinar la eficiencia térmica real de la torre enfriadora, este valor está muy relacionado con el obtenido en el modelo matemático que relaciona el L/G obtenido y el L/G de diseño igualmente referenciado en el cuadro 104.

Figura 35. Curva de diseño, Característica y de operación de la celda J.



Fuente: Autor del proyecto.

Cuadro 104. Eficiencia de la celda J.

EFICIENCIA DE LA CELDA	
L/G Diseño	0,940
L/G Intersección	0,660
Eficiencia de la celda	70,21%

Fuente: Autor del proyecto.

Los resultados tomados en campo y las simulaciones realizadas indican que la celda "J" presenta una eficiencia térmica del 70,2 % debido principalmente a:

1. El grado de inclinación de las aspas es de 9,9° con una potencia de operación del ventilador de tiro inducido de 190 amperios, razón por la cual esta celda opera a baja capacidad de remoción de calor.
2. La diferencial de remoción del calor es de 28,7 °F es bajo debido principalmente al estado de deterioro de los internos en el sistema de distribución.
3. Alta presión de retorno en 13,7 psig lo que genera sobre presión y canalización del flujo al interior del relleno y congestión en el atrapa neblinas.

4. CONCLUSIONES

Existe un marcado desbalance hidráulico evidenciado en la diferencia de flujos en cada una de las celdas de la torre; esta falla de control puede ser mitigado, instalando medición a cada celda, o balanceándolas con medidores portátiles.

La ejecución de las recomendaciones de corto plazo para mejorar las condiciones operacionales de la torre enfriadora generara un ahorro potencial de \$6.748.396.170 pesos para el año 2016.

Los resultados indican que de acuerdo a las condiciones actuales de operación la torre enfriadora no es capaz de retirar todo el calor ganado por la operación en las unidades de proceso; solo se retira el 95,6% de la energía.

Las competencias del personal de operaciones de las torres enfriadoras está limitada a la verificación de variables básicas, no está incluida la dosificación química, la interpretación de resultados técnicos ni al estudio del comportamiento termodinámico de la torre enfriadora; Para asegurar el entrenamiento, capacitación y toma de decisiones de los operadores en la operación óptima y segura de las torres enfriadoras en la Gerencia Refinería de Barrancabermeja se desarrolló una guía de trabajo para mejorar la capacidad de análisis operacional basado en las observaciones, mediciones y análisis de laboratorio.

5. RECOMENDACIONES

- **CORTO PLAZO**

La torre enfriadora STE-2945 debe operar con tres bombas centrifugas y ocho ventiladores de tiro inducido.

La Purga intermitente caliente debe recuperar su filosofía operacional y no mantener operación continua para retiro de calor.

Realizar medición de flujo a cada una de las celdas para balancear el flujo de agua de recirculación mejorando el balance térmico de cada una de las celdas.

Debido a las altas eficiencias presentadas por las celdas A; B y C deberían trabajar de manera continua al igual que la celda "D" que a pesar de estar fuera de servicio tiene el sistema de distribución y boquillas nuevas.

Sacar de servicio la SP-2945 E para proteger el activo debido a que está trabajando por debajo de la curva de diseño.

Incluir dentro de las guías de control operacional la presión de manejo en las líneas de recirculación a cada celda en 12 psig para protección de los internos de los distribuidores.

Asegurar el manejo del flujo de agua de restitución a valores máximos de 1341 gpm, mejorando el control sobre los ciclos de concentración entre 4 y 5 ciclos; adicionalmente debe controlarse la conductividad a valores entre 900 y 1050 μ mhos.

- **MEDIANO PLAZO**

El personal de operaciones debe recuperar el control de dosificación química, para lo cual deben ser entrenados nuevamente.

Asegurar la medición continúa, confiable y con registro digital en el programa PI web (programa de seguimiento en tiempo real de las variables de proceso) con el fin de mejorar el seguimiento y realizan análisis operacional en tiempo real.

Dentro de los planes de mantenimiento preventivo de los ventiladores de tiro inducido de la torre STE-2945 se debe ajustar el ángulo de inclinación a valores cercanos a 15 grados para incrementar su eficiencia.

- **LARGO PLAZO**

Realizar intervención y cambio de distribuidores de cada una de las seis celdas pendientes, con el fin de instalar boquillas y mejorar la distribución de las gotas de agua en cada una de las áreas de la celda.

BIBLIOGRAFIA

- BLANCO Andrés. Estudio y cálculo de torres de refrigeración de tiro inducido y flujo cruzado. Proyecto fin de carrera (Ingeniero Mecánico). Universidad Carlos III de Madrid. España, 2011.
- CALDERON Blanca y PINTO Geobel. Desarrollo de una herramienta para la evaluación de la eficiencia de una torre de enfriamiento de agua. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Químico. Universidad Industrial De Santander. Facultad De Ingenierías Físico-Químicas. Bucaramanga, 2004.
- CAMPOS A, Juan Carlos. Evaluación energética de torres de enfriamiento. UPME, COLCIENCIAS Agosto 16 de 2011. Disponible en: [www.si3ea.gov.co /Portals /0/Gie/Tecnologias/torres.pdf](http://www.si3ea.gov.co/Portals/0/Gie/Tecnologias/torres.pdf)
- CLARIANT. Aplicación Master Best Practices Sistema de Enfriamiento TE – 2945. SMIWT-3575. Ecopetrol SIBA. Bogotá, 12 de Diciembre de 2012.
- COOLING TOWER INSTITUTE. CTI code tower, standard specifications. Redwood lumber specifications. Industrial Water cooling towers. Part I and part II, 1971.
- DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING. Technical Studies Institute, Abu Dhabi, United Arab Emirates Experimental study and predictions of an induced draft ceramic tile packing cooling tower Volume 47, Issues 15–16, September 2006, Pages 2034–2043
- EDOSPINA S.A. Ecopetrol. TE-2945. Induced draft counterflow, Datos de diseño de la torre enfriadora TE-2945. Archivo técnico Ecopetrol S.A, 2006.
- ECOPETROL S.A. Proceso de eliminación de defectos. ANÁLISIS DE CAUSA RAIZ. Problemática del sistema de enfriamiento de la Unidad de Balance. Barrancabermeja, Abril, 2008.
- HERNANDEZ Juan Carlos. Manual de operación de las torres enfriadoras de la unidad de Balance P. 7-59. ECOPETROL S.A. Barrancabermeja, 2005.
- NOLTAGE, H.B. Merkel's cooling diagram a performance correlations for air water evaporative cooling systems. ASHVE transacción, 1941. p. 47- 429.
- QUIROGA Alejandro. Diseño de un sistema de agua de refrigeración en ciclo cerrado para una refinería de petróleo en Tarragona. España, 2012. Trabajo de grado (Ingeniero Mecánico). Escuela Técnica Superior de Ingeniería. ICAI.

RODRÍGUEZ Jorge. Introducción a la termodinámica. Aire húmedo y teoría de las torres de enfriamiento. P.503 – 541. Universidad Tecnológica Nacional.

TECNIAVANCE INGENIEROS LTDA. Ingeniería de proyectos. Desempeño de las torres enfriadoras de enfriamiento. Ecopetrol. TE-2945. Barrancabermeja, 1991.

TORRES Alberto. Trabajo de grado, escuela superior politécnica nacional. Diseño de una torre para uso industrial, cap 2, 20-65. Cap3 66-118

VARGAS Leonor. Evaluación del sistema de enfriamiento TE-2945. Ecopetrol. Barrancabermeja, Julio 12 de 1993.

ANEXOS

Anexo A. APENDICES

NOMENCLATURA

G: Caudal de aire.

L: Caudal de agua.

Y: Humedad en masa de agua/ masa de aire seco.

Y_1 : Humedad en masa de aire seco.

Y_2 : Humedad en masa de aire húmedo.

G' : Caudal de aire seco.

h_1 : Entalpía del aire de entrada.

h_2 : Entalpía del aire de salida.

t_a : Temperatura del agua de restitución.

t_{sa} : Temperatura de salida del agua.

K: Coeficiente de transferencia de masa.

a: Área de contacto dividida por el volumen de la torre.

V: Volumen activo por unidad de superficie de relleno de la torre.

L: Flujo de agua para las condiciones de prueba y/o flujo de agua para condiciones específicas de prueba.

G: Flujo de aire que ingresa a cada una de las celdas de la torre enfriadora.

T_{hw} = Temperatura del agua caliente.

T_{cw} = Temperatura del agua fría.

E_{ao} = Entalpía de salida del aire en términos de bulbo húmedo.

E_{wb} = Entalpía de entrada del aire en términos de bulbo húmedo.

R = Caudal másico de reposición.

P = Caudal másico de purga.

A = caudal másico de arrastre.

E = caudal másico debido a la evaporación.

$$\rho = \text{Densidad del aire } \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

$$\rho = \text{Densidad del aire } \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

$$M_a: \text{Masa molar del aire seco} = 0,0289635 \frac{\text{Kg}}{\text{mol}}$$

Z: Factor de compresibilidad adimensional = 1,0

$$R: \text{Constante molar de los gases} = 8,31451 \frac{\text{J}}{\text{K} * \text{mol}}$$

T: Temperatura termodinamica en K.

X_v : Fraccion molar de vapor de agua, adimencional = 0,0100

$$M_v: \text{Masa molar del vapor de agua} = 0,0180154 \frac{\text{Kg}}{\text{mol}}$$

$h_1 = E_{wb}$ (entalpía del aire)

TRATAMIENTO DE AGUAS

El agua de restitución a la STE-2945 proviene el proceso de tratamientos de la planta de agua de la unidad de balance que tiene como objetivo suplir las necesidades de agua tratada.

La planta de agua de la unidad de Balance está diseñada para tratar la mezcla de fuentes de agua natural proveniente del Río Magdalena y Ciénaga San Silvestre,

CARACTERISTICAS AGUA CRUDA RIO MAGDALENA.		
PARAMETRO	VALOR	UNIDADES
COLOR	300-800	UPC
TURBIEDAD	500-1000	NTU
ALCALINIDAD	50-80	Ppm CaCO ₃
DUREZA	50-80	Ppm CaCO ₃

Las características físico-químicas del agua cruda la ciénaga san silvestre son principalmente:

CARACTERISTICAS AGUA CRUDA CIENAGA SAN SILVESTRE		
PARAMETRO	VALOR	UNIDADES
COLOR	800-1000	UPC
TURBIEDAD	20-50	NTU
ALCALINIDAD	10.20	Ppm CaCO ₃
DUREZA	20-30	Ppm CaCO ₃

Los parámetros de calidad de agua producto de la planta de aguas de la unidad de Balance son:

PARAMETROS CALIDAD PLANTA DE AGUAS BALANCE.		
PARAMETRO	VALOR	UNIDADES
COLOR	20-50	UpC
TURBIEDAD	1.0-5.0	NTU
ALCALINIDAD	5.0-10.0	Ppm CaCO ₃
DUREZA	40-60	Ppm CaCO ₃

Los depósitos son rara vez compuestos de un solo elemento, sino que generalmente son una mezcla de varias sustancias minerales, productos de corrosión y otras contaminaciones. Los depósitos más comunes en tuberías, intercambiadores, condensadores, evaporadores, torres de enfriamiento son: Carbonato de Calcio, Sulfatos de Calcio, Silicatos de Calcio, Hidróxido de Magnesio, Silicato de Magnesio, Óxido de Hierro, sílice y lodos.

Impurezas del agua que producen corrosión.

En términos generales, la corrosión es el regreso de un metal a su forma mineral de origen. Por ejemplo, el Hierro se revierte a Óxido de Hierro con la oxidación. El proceso de corrosión, sin embargo es una reacción electroquímica muy compleja y que puede tomar muchas formas.

El método para eliminar las impurezas del agua cruda en la unidad de Balance es el proceso de clarificación para eliminar las sustancias suspendidas y el color del agua. Los materiales en suspensión pueden ser grandes partículas que se asientan fácilmente.

VARIABLE.	PARÁMETRO DE CONTROL.
PH	7.0 – 7.6
Alcalinidad Total (ppm CaCO ₃)	15 – 60
Hierro (ppm)	Max. 3
Aluminio (ppm)	Max. 2
Ortofosfato Soluble (ppm)	12 – 14
Dureza Total (ppm CaCO ₃)	200 – 500
Conductividad (Micromhos)	Max. 1200
Cloro Libre (ppm)	0.2 – 0.3
Hidrocarburo (ppm)	Max.10
Sólidos Suspendidos (ppm)	Max. 100
Turbiedad, NTU	Max. 60
Temperatura (°F)	Max. 120
R/C	3.8 – 5

Tratamientos químicos.

El control o tratamiento químico consiste en la alteración de las características físico –química del agua hasta ajustarla a los parámetros deseados con el objetivo principal de preservar la integridad de la metalurgia y de los diferentes equipos que intervienen en todo el circuito de enfriamiento.

La corrosión e incrustaciones son los efectos más perjudiciales de un control químico inadecuado, tienen su efecto negativo en roturas, pérdidas de rendimiento, acelerado desgaste de los materiales y fallas continuas en equipos estáticos y rotativos.

Corrosión.

Es la reacción química o electroquímica que se produce entre un material y el medio, que conlleva en la degradación del metal y la pérdida de sus propiedades, la corrosión se produce por el oxígeno disuelto en el agua, por el Dióxido de Carbono ,por ácidos o por presencia bacteriana especialmente la anaeróbica

(llamada corrosión bajo depósito). El ataque químico comienza en la superficie se propaga al interior.

Los métodos utilizados en la Unidad de Balance para el control de corrosión en el sistema de enfriamiento son la utilización de inhibidores de corrosión y dispersantes.

Corrosión Galvánica.

Esta forma relativamente común de corrosión resulta cuando dos metales distintos se conectan y se exponen a un ambiente acuoso; un metal se vuelve catódico y el otro anódico, estableciéndose una celda galvánica. Por ejemplo, cuando el acero y el cobre se conectan en agua, el acero se convierte en ánodo. Se dice que es anódico respecto al cobre, que es el cátodo.

La pérdida de metal ocurre en el ánodo, de manera que el acero se corroe. Cátodo grande: velocidad de corrosión alta; cátodo pequeño: velocidad de corrosión baja; ánodo más grande: pérdida de metal por corrosión general; ánodo pequeño: ataque tipo picadura.

Inhibidores de corrosión

Cualquier producto químico aplicado al agua que detenga la reacción anódica detendrá la corrosión; cualquier material que se añada para reducir la velocidad de la reacción catódica reducirá la corrosión; por tal razón se utiliza un inhibidor que para la reacción anódica y catódica para reducir la corrosión.

Inhibidor anódico. Funcionan impidiendo reacción anódica rompiendo el circuito electroquímico parando totalmente la oxidación del ánodo porque de otra manera la velocidad de corrosión no disminuirá. La pérdida del metal se concentrará en cualquier área anódica que quede, produciendo PITTING. Este reacciona con un producto de corrosión tal como Fe^{++} , para formar una sal insoluble o un complejo que precipita como película en los sitios anódicos ejemplo: Ortofosfatos los cuales forman películas de ortofosfato férrico.

Los inhibidores anódicos tienen un riesgo: si se aplican en cantidades insuficientes, ellos no vuelven pasivos los puntos anódicos. En estas circunstancias, los pocos sitios anódicos que quedan se convierten en el punto focal de todo el flujo de electrones al área de reacción catódica y puede manifestarse un picado profundo.

Inhibidor catódico. Generalmente reducen la velocidad de corrosión por formación de película en el sitio catódico, restringiendo la migración del H^+ y oxígeno hacia la superficie catódica para completar la reacción de corrosión.

Este forma barreras insolubles por alto pH en el cátodo. Ej. Zinc el cual puede formar películas de $Zn(OH)_2$ o $Zn_3(PO_4)_2$.

Incrustaciones.

Se deben principalmente a las sales de calcio y magnesio presentes que al calentarse se concentran y precipitan dando lugar a los depósitos que forman una capa aislante impidiendo el intercambio de calor; igualmente las incrustaciones afectan los equipos rotativos y estáticos debido principalmente a la incrustación en alabes que ocasionan desbalanceo y pérdidas de eficiencia, adicionalmente obstruyen los orificios de los intercambiadores de calor en las unidades de proceso.

La formación de incrustaciones en un sistema de enfriamiento puede ser prevenida por tres formas básicas:

- Control en los ciclos de concentración.
- Adición de ácido para reducir pH y alcalinidad: Esto reducirá la tendencia a la formación de incrustación, pero incrementará el potencial de corrosión, sin embargo debido a las características de agua de restitución esta práctica fue suspendida años atrás.
- Aplicación de inhibidores de incrustación.

Ensuciamiento.

El ensuciamiento es la acumulación de material suspendido o material biológico. Para prevenir el ensuciamiento podemos hacer lo siguiente.

- Prevención mediante el control del agua de reposición (clarificada)
- Buen control de corrosión, incrustación y microbiológico
- Incremento de purga.

TRATAMIENTO QUÍMICO UTILIZADO EN LA TORRE ENFRIADORA STE-2945

El tratamiento suministrado por la compañía CLARIANT es el siguiente:

PRODUCTO	FUNCIÓN
CORRTREAT CW 7358	Inhibidor de Corrosión para Acero al carbón; dispersante de hierro y aluminio
CORRTREAT CW 7330	Inhibidor de Corrosión para Aleaciones de Cobre
SCALETREAT CW 8300T	Dispersante de zinc, fosfato, hierro, sólidos suspendidos.
BIOTREAT CW 4656	Estabilizador de Cloro y Biodispersante
COLORO GASEOSO	Biocida Oxidante

INHIBIDOR DE CORROSIÓN PARA ACERO CARBÓN Y ESTABILIZADOR DE CORRTREAT CW 7358: Es un producto formulado con base en fosfatos, cinc, y dispersante de aluminio e hierro. Este producto pertenece a nuestra línea tecnológica de fosfato/cinc, tecnología aplicada en aquellos sistemas en donde los HTI son grandes y pueda tener altas cargas térmicas en sus sistemas; cumple las siguientes funciones:

- Fosfatos: Inhibidor de corrosión anódico para acero al carbón, el cual trabaja como inhibidor primario precursor de la formación de la película de hierro gamma, $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$, bloqueando la reacción de la celda de corrosión.
- Cinc: Inhibidor catódico. Fundamental en todos los programas de tratamiento con aguas de carácter corrosivo (mínima capacidad buffer). Trabaja formando una película de hidróxido de cinc sobre el cátodo al momento de la aparición de las celdas electrolíticas; por esto la demanda mínima de cinc en estos sistemas es del orden de 2 ppm.
- Dispersante de Aluminio e hierro: Trabajan acomplejando el aluminio e hierro proveniente del proceso de clarificación.

INHIBIDOR DE CORROSIÓN PARA ALEACIONES DE COBRE CORRTREAT CW 7330: Es una mezcla de azoles (tolyltriazol y benzotriazol) para proteger la metalurgia amarilla, actúa por absorción química para evitar la pérdida de cobre y deshincado de la aleación de admiralty.

DISPERSANTE DE CINCO – FOSFATO - HIERRO Y SÓLIDOS SUSPENDIDOS SCALETREAT CW 8300T: Es un producto formulado con base en polímero dispersante aniónico y mantiene las siguientes funciones:

Polímero: Es un dispersante 100% polímero líquido de tecnología Clariant y capaz de manejar las especies químicas presentes en los sistemas de enfriamiento.

Este dispersante trabaja por los mecanismos de:

Estabilización: Impidiendo la formación de pares iónicos (solubilización).

Modificador de superficie: Limitando el crecimiento de depósitos y modificando las películas protectoras de corrosión.

ESTABILIZADOR DE CLORO Y BIODISPERSANTE BIOTREAT CW 4656

Es una solución acuosa de dispersantes no iónicos y un estabilizador de cloro tipo inorgánico.

El estabilizador reduce las pérdidas de cloro en sistemas de enfriamiento abiertos, permitiendo mayor efectividad del cloro sobre los microorganismos.

BIOCIDA OXIDANTE: CLORO GASEOSO

Es el biocida más utilizado para el control microbiológico, debido a la inmunización microbiana que se crea,

Al agregarse al agua se hidroliza para formar ácido clorhídrico e hipocloroso motivo por el cual el PH tiende a bajar.

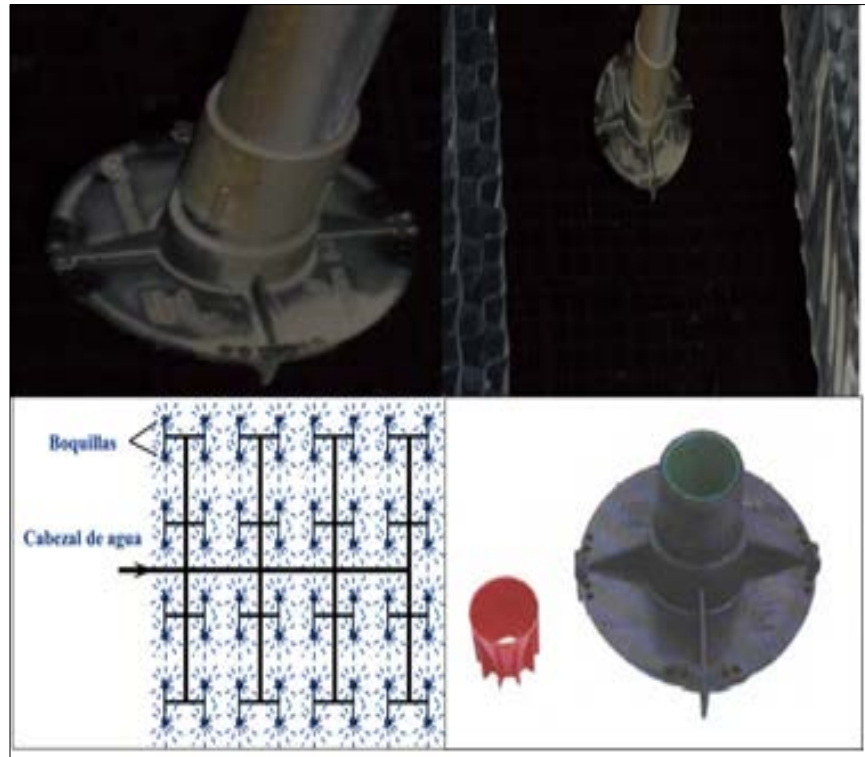
Es altamente efectivo contra las bacterias patógenas, además produce oxidación en la materia orgánica en el agua antes de ejercer la acción bactericida.

La dosificación se realiza mediante la siguiente formula.

Cloro gaseoso = $0.392 * \text{flujo de recirculación} * 0.01 = \text{Lb/día}$.

Anexo B. Imágenes de las boquillas de la celda A; B C y D.

BOQUILLAS



Fabricadas en polipropileno; para operar a baja presión y a temperaturas máximas de 200°F.

El agua es distribuida de manera uniforme en cada celda para lograr la remoción deseada de calor en las celdas A; B; C y D.

Anexo C. Imágenes de las boquillas de la celda E; F; G; H; I y J.



Las celdas que no han sido intervenidas presentan un tubo con un codo circular que hace las veces de boquilla, este tipo de accesorios no genera la gotas homogéneas que permitan mejorar e incrementar el área de contacto entre la gota de agua y el aire ascendente.

Anexo D. Imágenes de las boquillas en operación de la celda E; F; G; H; I y J.



Las pruebas realizadas en las celdas I y J evidencian que las boquillas que tienen instaladas no generan gotas finas y por el contrario el flujo de agua sale en chorros que dificultan la transferencia termica y no utilizan adecuadamente el area total de la torre.

Anexo E. Imágenes del relleno de las celdas E; F; G; H; I y J.

RELLENOS



Los rellenos de las celdas se encuentran en muy buen estado, no se observan tapados ni con acumulaciones importantes de lodo o basura.

**Anexo F. Imágenes del estado de los distribuidores de las celdas
E; F; G; H; I y J.**

DISTRIBUIDORES



Anexo G. Imágenes de distribuidores dañados en las celdas H; I y J.



Los distribuidores de las celdas E; F, G; H, I y J se encuentran en muy mal estado, presentan taponamiento, tubería en el piso, altos niveles de corrosión y salida no uniforme del agua por los tubos de salida.

Anexo H. Imágenes de los atrapa neblinas de las celdas E; F; G; H; I y J.

ATRAPA NEBLINA



Los atrapa neblinas de las celdas E; F, G; H, I y J se encuentran en muy mal estado presentan zonas con roturas y áreas sin tejas.

En la celda J se observa gotas de agua en el área entre el atrapa neblina y la base de los ventiladores, evidenciando baja eficiencia de la zona empacada.

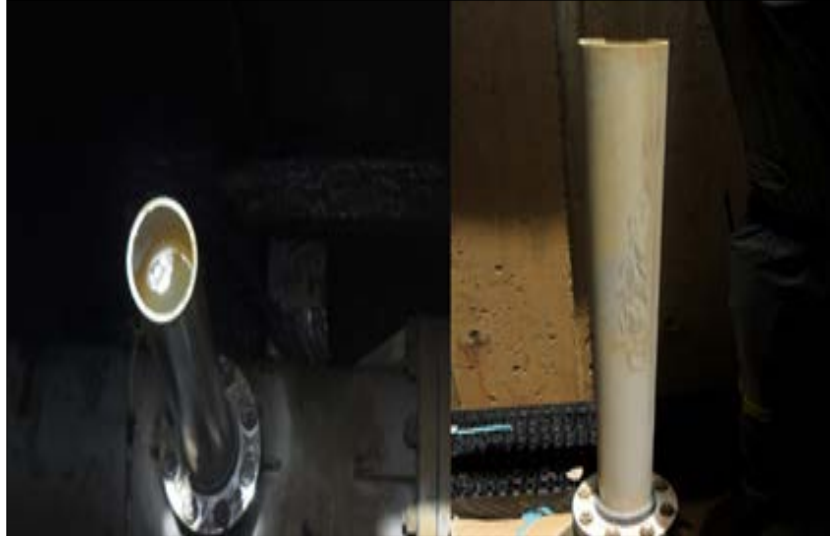
Anexo I. Imágenes de los atrapa neblinas de las celdas A; B; C y D.



Los atrapa neblinas en las celdas intervenidas evidencian deterioro en las uniones realizadas entre los paneles, esta observación fue ejecutada en las celdas A y la celda B, por tal razón se requiere intervención y recuperación de las mismas para evitar que la zona pierda su capacidad de retención de agua; los atrapa neblinas evidencian una muy buena operación porque se observa una capa de aire húmedo son gotas de agua.

Anexo J. Imágenes de los sistemas de alivio de las celdas A; B; C y D.

SISTEMAS DE ALIVIO



Los sistemas de alivio aplican para las celdas A; B; C y D, el sistema de alivio es un tubo de 2" de diametro y tienen como función proteger los internos de los distribuidores contra las altas presiones.

**Anexo K. Imágenes de la operación de los sistemas de alivio de las celdas
A; B; C y D.**



El sistema de alivio tiene una altura de 150 cm desde la base de la línea de distribuidor y está instalada en las cuatro esquinas del área de la celda.

Este sistema está diseñado para proteger La boquillas contra altas presiones y no debe estar operando en operación normal; por tal razón evidencia que el retorno de agua a la torre enfriadora está sobre presionado como realmente ocurre; la torre opera con valores superiores a 14 psig y el diseño establece 12 psig.

Anexo L. Imágenes de los motores y ventiladores de tiro inducido.

VENTILADORES DE TIRO INDUCIDO



Los ventiladores de tiro inducido de la torre enfriadora se encuentran en buen estado, los ángulos de inclinación de las aspas deben ser incrementados hasta 14 grados para permitir que los activos trabajen con mayores rendimientos a los presentados actualmente.

Anexo M. Imágenes del manejo de las purgas en la torre enfriadora.

PURGAS



Actualmente la torre enfriadora opera con la purga intermitente caliente con un porcentaje abierta y la purga continua abierta, esta situación es utilizada especialmente para el control de especies química; sin embargo los ciclos de concentración son manejados con valores cercanos a 5.0 ciclos y la purga debe estar siempre cerrada y ser utilizada únicamente para contingencias.

Anexo N. Imágenes de la operación de la celda J.

OPERACIÓN DE LAS CELDAS



La celda J evidencia canalización del flujo y áreas donde no se presenta transferencia de calor, adicionalmente presenta bajo flujo de agua. Esta celda debe ser intervenida.

Anexo O. Imágenes de la operación de la celda G.



La celda G es la que evidencia menor flujo de agua, menor transferencia térmica y daños en distribuidores y atrapa neblinas, adicionalmente gran parte del flujo de la celda está en un solo sector.

Anexo P. Imágenes de la operación de la celda F.



La celda F opera muy bien aun cuando sus internos no han sido intervenidos, su operación esta beneficiada porque los valores de agua de retorno están cerca a la de diseño, es el ventilador que mayor potencia tiene y los internos no están deteriorados.

Anexo Q. Imágenes de la operación de la celda C.



Las celdas A; B y C son las que mejor perfil se les observa; sin embargo el ángulo de inclinación del agua en su caída a la piscina es muy bajo por tal razón se requiere ajustar el flujo de agua al diseño para mejorar la transferencia térmica y lograr la máxima eficiencia.