

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

MEJORAMIENTO EN EL FUNCIONAMIENTO DE LOS CONDENSADORES EVAPORATIVOS, UTILIZADOS EN LA INDUSTRIA ALIMENTICIA CORRALITO (INACOR) PARA LA CONDENSACIÓN DE AMONÍACO

**Presentado ante la Ilustre Universidad Central
de Venezuela para optar al Título de Ingeniero
Químico, por la bachiller Lameiro Martínez,
Melody Adriana.**

Caracas, Noviembre de 2005

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

MEJORAMIENTO EN EL FUNCIONAMIENTO DE LOS CONDENSADORES EVAPORATIVOS, UTILIZADOS EN LA INDUSTRIA ALIMENTICIA CORRALITO (INACOR) PARA LA CONDENSACIÓN DE AMONÍACO

TUTOR ACADÉMICO: Profa. Mary Luz Alonso
TUTOR INDUSTRIAL: Ing. Ignacio Pérez

**Presentado ante la Ilustre Universidad Central
de Venezuela para optar al Título de Ingeniero
Químico, por la bachiller Lameiro Martínez,
Melody Adriana.**

Caracas, Noviembre de 2005

Caracas, 16 de Noviembre del 2005

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Química, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por la bachiller Melody Adriana Lameiro Martínez, titulado:

**MEJORAMIENTO EN EL FUNCIONAMIENTO DE LOS
CONDENSADORES EVAPORATIVOS, UTILIZADOS EN LA
INDUSTRIA ALIMENTICIA CORRALITO (INACOR) PARA
LA CONDENSACIÓN DE AMONÍACO**

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Químico y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por la autora, lo declaran APROBADO.

Profa. Anubis Pérez
Jurado

Profa. Alejandra Meza
Jurado

Profa. Mary Luz Alonso
Tutor Académico

DEDICATORIA

Este trabajo se lo dedico a las personas más importantes en mi vida:

A mis padres, por haber estado conmigo desde el comienzo de mi carrera, por asesorarme académicamente en mis trabajos, por apoyarme económica y moralmente en todas las etapas de mi vida. Por estar a mi lado en las fases más difíciles y aceptarme con mis defectos y virtudes, sin importar las acciones que les pudieran causar inconformidad. Los Quiero Mucho.

A mis hermanos, porque a pesar de no compartir ciertas actitudes entre nosotros, los quiero mucho y que esto les sirva de estímulo para que logren las metas que se propongan.

A Johnny, porque me enseñó cosas importantes y bonitas de la vida, me acompañó en mis luchas, por tenerme paciencia en mis momentos de angustias y desesperanzas, por ayudarme a ver que las cosas son posibles si uno las quiere, y a esforzarnos por tener la familia que tanto queremos, sin importar las batallas y los sacrificios que hemos tenido que vencer; ahí estamos juntos, unidos los tres, creciendo con nuestro amor y nuestra compañía. Que esto sirva de estímulo para él en sus metas académicas y personales. Te Amo Mucho.

A mi hijo Andrés, porque a pesar de haber nacido en un momento difícil, su ternura y compañía me hicieron conocer cosas importantes, como la fuerza, la gran capacidad de ser madre y alumna a la vez, el luchar sin descanso para alcanzar mis metas, sin interesar los trasnocho, el sacrificio, la paciencia que se necesita para llevar una familia adelante; porque dentro de mis angustias él era mi guía, mi luz, mi claridad, mi descanso interno, la comprensión que tanto hace falta, la compañía incondicional. Gracias mi rey por estar conmigo, por secarme tantas lágrimas y por todo tu amor, porque este logro es para y por ti. Te Amo Mucho mi corazón.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero agradecerle a Dios, por ser mi guía y mi compañía en cada instante de mi vida, por darme todo lo que tengo: una buena salud, una gran familia, un hijo y un esposo maravillosos, la oportunidad de estudiar y ser una profesional, y la posibilidad de estar estable en cada una de las fases de mi vida.

A mis padres y hermanos, porque dieron todo lo que estaba a su alcance para ofrecerme todo sin importar nada, por apoyarme en los momentos más difíciles y por quererme tanto como lo hacen. Gracias, éste también es su logro.

A Johnny y Andrés, por alcanzar esta meta a mi lado, por amarme tanto como lo hacen, por soportar tantos malos ratos ocasionados por la falta de tiempo, por ayudarme y apoyarme en esta etapa tan importante, por ser tan maravillosos conmigo. Gracias, éste también es su logro.

A la Prof. Mari Luz Alonso que a lo largo de la carrera me ha ayudado mucho, es una profesional a cabalidad y al servicio del alumnado. Manténgase así y muchas gracias por todo.

A mis amigas, Ginna Martínez, Laura Morantes, Marisela Rojas y Nury Guaran por estar conmigo, apoyarme y acompañarme en los momentos que más las he necesitado. ¡Sigán luchando que ustedes también lo van a lograr!

A María, por su comprensión, su gran apoyo y ayuda, y su calidad de amistad, lo que me hizo sentirme acompañada en los momentos difíciles, en mi transcurso por la Universidad. ¡Muchos éxitos!

A la Industria Alimenticia Corralito, a las personas que me dieron la oportunidad de llevar a cabo mis Tesis en la industria, la Sra. Martha Ovalles, y muy especialmente a los Ingenieros Ignacio Pérez y Ernesto Vázquez, por enseñarme todos los conocimientos necesarios para el buen desarrollo del Trabajo, por sus opiniones constructivas, así como muchas otras cosas adicionales para una mejor preparación y desenvolvimiento en el campo laboral. También quiero agradecerle al personal de Laboratorio (Norelys Ascanio, Maria Elena Romero, Sandra Barcarcel y la Sra. Irma González) por la colaboración, apoyo y enseñanza durante la elaboración del Trabajo. ¡Gracias!

Lameiro M. Melody A.

**MEJORAMIENTO EN EL FUNCIONAMIENTO DE LOS
CONDENSADORES EVAPORATIVOS, UTILIZADOS EN LA
INDUSTRIA ALIMENTICIA CORRALITO (INACOR) PARA
LA CONDENSACIÓN DE AMONÍACO**

Tutor Académico: Prof. Mari Luz Alonso
Tutor Industrial: Ing. Ignacio Pérez.
Tesis, Carrizal, Edo. Miranda
U.C.V. Facultad de Ingeniería.
Escuela de Ingeniería Química. Año 2005. 150p.

Palabras Claves: Condensador evaporativo, incrustaciones, amoníaco

Resumen.

En la industria alimenticia, un sistema de refrigeración es fundamental, ya que éste se encarga de crear las condiciones de temperaturas apropiadas en determinado refrigerante, y a su vez, pueda mantener y conservar los diferentes productos que allí se manipulan.

En los sistemas de refrigeración se emplean diversos equipos, uno de los cuales es el condensador, siendo en este caso particular, de tipo evaporativo. Los condensadores evaporativos operan de manera similar a las torres de enfriamiento, empleando mezclas de aire-vapor de agua como medio condensante.

El agua es un recurso muy importante, por esto debe tener un tratamiento previo a su utilización a fin de evitar la formación de incrustaciones y corrosión en la parte interna de los equipos.

Durante cierto tiempo, en Industrias Alimenticias Corralito se han presentado ciertos inconvenientes en el Sistema de Refrigeración de Planta Nueva, ya que no se han podido mantener las condiciones adecuadas de

temperatura en las diferentes áreas de la empresa. Una de las causas más importantes de este problema, es la cantidad de incrustaciones que presentan los condensadores evaporativos, lo que impide que la transferencia de calor sea eficiente y la capacidad de los mismos sea óptima.

En vista de lo explicado anteriormente, se planteó como objetivo principal de este Trabajo Especial de Grado, mejorar el funcionamiento de los Condensadores Evaporativos de Planta Nueva, respecto a las incrustaciones externas de los tubos, y establecer diferentes propuestas para mantener la vida útil de los mismos.

Como paso inicial, se estimó la cantidad de agua evaporada en los equipos a partir de una metodología experimental para compararlos con el valor del fabricante. Posteriormente, se desarrollaron varios tipos de pruebas, con productos químicos desincrustantes y para tratamientos preventivos con la finalidad de minimizar y evitar la formación de nuevas incrustaciones sobre los tubos.

Las mediciones de caudales de agua evaporada, realizadas inicialmente, arrojaron unos niveles de operatividad de los condensadores del 50% con respecto al valor suministrado por el fabricante; después de los tratamientos químicos y mecánicos aplicados a cada uno de ellos, los respectivos caudales aumentaron hasta alcanzar un 70% aproximadamente.

Finalmente, se llegó a la conclusión de la necesidad de mantener una alimentación con una mezcla de agua suave y agua dura, así como una dosificación continua y automática de productos inhibidores, para proteger el sistema de la formación de nuevas incrustaciones y de la corrosión.

ÍNDICE GENERAL

| | Página |
|--|--------|
| ÍNDICE DE FIGURAS | xii |
| ÍNDICE DE TABLAS | xiv |
| LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS | xv |
| GLOSARIO | xviii |
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| CAPÍTULO I: Fundamentos de la Investigación | 3 |
| I.1. Planteamiento del Problema | 3 |
| I.2. Objetivos | 5 |
| I.2.1. Generales | 5 |
| I.2.2. Específicos | 5 |
| CAPÍTULO II: Sistemas de Refrigeración | 7 |
| II.1. Refrigeración | 7 |
| II.2. Etapas de la Refrigeración | 11 |
| II.2.1. Proceso de Expansión | 11 |
| II.2.2. Proceso Vaporizante | 13 |
| II.2.3. Proceso de Compresión | 14 |
| II.2.4. Proceso de Condensación | 16 |
| II.3. Ciclo de Refrigeración Saturado Simple | 18 |
| II.3.1. Efecto de la temperatura de succión en la eficiencia del Ciclo | 19 |
| II.3.2. Efecto de la temperatura condensante en la Eficiencia del Ciclo | 21 |
| II.4. Ciclos Reales de Refrigeración | 23 |
| II.4.1. Efectos del Sobrecalentamiento en el vapor de succión | 23 |
| II.4.2. Efectos del Subenfriamiento en el líquido | 25 |
| CAPÍTULO III: Equipos empleados en el Sistema de Refrigeración | 27 |
| III.1. Dispositivos de Expansión | 27 |
| III.1.1. Válvulas de expansión de presión constante | 27 |
| III.1.2. Válvulas de Flotador o Reguladores de Caudal | 27 |
| III.1.3. Válvulas de expansión termostática | 28 |
| III.2. Evaporadores o Enfriadores | 29 |
| III.3. Compresores | 31 |
| III.3.1. Ciclo de compresión | 31 |
| III.3.2. Variación de la capacidad del compresor con la Temperatura de succión | 33 |
| III.3.3. Efecto de la temperatura condensante en la capacidad del compresor | 34 |
| III.4. Condensadores | 35 |
| III.4.1. Transferencia simultánea de Calor y Masa | 44 |

| | Página |
|--|-----------|
| III.4.1.1. Humedad Absoluta | 45 |
| III.4.1.2. Mezcla de vapor de agua – aire, saturada | 45 |
| III.4.1.3. Mezcla de vapor de agua – aire, no saturada | 46 |
| III.4.1.4. Humedad Relativa | 46 |
| III.4.1.5. Humedad Absoluta por ciento | 46 |
| III.4.1.6. Relación entre H.R. y % Sat | 47 |
| III.4.1.7. Punto de Rocío | 47 |
| III.4.1.8. Volumen Húmedo | 47 |
| III.4.1.9. Calor Húmedo | 48 |
| III.4.1.10. Entalpía | 48 |
| III.4.1.11. Sistema Aire – Agua | 49 |
| III.4.1.12. Temperatura de Bulbo Húmedo | 50 |
| III.4.2. Operación no adiabática : Enfriamiento por Evaporación | 52 |
| CAPÍTULO IV: Tratamiento Químico del agua | 54 |
| IV.1. Características físicas del agua | 56 |
| IV.2. Características Químicas del agua | 56 |
| IV.3. Problemas ocasionados por la presencia de impurezas en el agua | 57 |
| IV.3.1. Corrosión | 57 |
| IV.3.2. Incrustaciones | 58 |
| IV.3.2.1. Elementos que favorecen la formación de Incrustaciones | 61 |
| IV.3.2.1.1. Sobresaturación | 61 |
| VI.3.2.1.2. Nucleación | 62 |
| VI.3.2.1.3. Tiempo de Contacto | 62 |
| VI.3.2.1.4. Formación de Incrustaciones por Precipitación | 62 |
| IV.3.2.2. Factores que incrementan la formación de Incrustaciones | 63 |
| IV.3.2.2.1. pH | 63 |
| IV.3.2.2.2. Temperatura | 63 |
| IV.3.2.2.3. Sólidos Totales Disueltos (TDS) y Sólidos en suspensión | 63 |
| IV.3.2.2.4. Factores Hidrodinámicos | 63 |
| IV.3.2.2.5. Corrosión | 63 |
| IV.3.2.2.6. Ensuciamiento | 64 |
| IV.3.2.3. Inhibidores de Incrustaciones | 64 |
| IV.3.2.3.1. Mecanismos | 64 |
| IV.3.2.3.1.1. Inhibición Umbral | 64 |
| IV.3.2.3.1.2. Secuestrantes | 64 |
| IV.3.2.3.1.3. Dispersantes | 65 |
| IV.3.3. Ensuciamiento | 65 |

| | Página |
|---|-----------|
| IV.3.3.1. Efecto del ensuciamiento sobre la efectividad del Sistema de Enfriamiento | 66 |
| IV.3.3.2. Métodos para controlar el ensuciamiento | 66 |
| IV.3.3.2.1. Ajustes mecánicos | 66 |
| IV.3.3.2.2. Productos Químicos | 67 |
| IV.3.4. Formaciones Microbiológicas | 67 |
| IV.4. Análisis físico químicos realizados al agua | 68 |
| IV.4.1. Instrumentales | 68 |
| IV.4.1.1. pH | 68 |
| IV.4.1.2. Conductividad (TDS) | 69 |
| IV.4.2. De Titulación | 69 |
| IV.4.2.1. Dureza | 69 |
| IV.4.2.2. Alcalinidad | 69 |
| IV.4.3. Colorimétricos | 70 |
| IV.4.3.1. Hierro | 70 |
| IV.4.3.2. Sílice | 70 |
| IV.5. Productos Químicos Desincrustantes | 70 |
| IV.5.1. Producto AS | 71 |
| IV.5.2. Producto AF | 71 |
| IV.5.3. Producto D | 71 |
| IV.5.4. Producto L | 72 |
| IV.6. Productos Químicos para el Tratamiento Preventivo | 72 |
| IV.6.1. Producto AT | 73 |
| IV.6.2. Producto C | 73 |
| IV.6.3. Producto IC | 73 |
| CAPITULO V: Metodología de la Investigación y Plan de Experiencias | 74 |
| V.1. Metodología | 74 |
| V.2. Descripción de instrumentos y equipos empleados | 80 |
| V.2.1. pH-metro | 80 |
| V.2.2. Conductímetro | 81 |
| V.2.3. Instrumentos para titulación | 81 |
| V.2.4. Higrómetro | 81 |
| V.3. Condiciones iniciales del Sistema de los condensadores evaporativos | 82 |
| V.4. Condiciones de las Pruebas de Productos Químicos Desincrustantes | 83 |
| V.5. Consideraciones para la determinación de la cantidad de agua evaporada en los Condensadores Evaporativos | 84 |
| V.6. Evaluación de la capacidad de los suavizadores de agua utilizados para las calderas, para alimentar agua suave a los Condensadores | 86 |
| V.7. Análisis de la calidad del agua a alimentar en los Condensadores, y del sistema de flujo a utilizar | 87 |

| | Página |
|---|------------|
| V.8. Condiciones de las pruebas para los productos químicos a utilizar en el tratamiento preventivo | 87 |
| V.9. Estudio del sistema de flujo para la implementación de un Sistema Dosificador de productos | 88 |
| V.10. Realización de análisis de agua para el control de corrosión, Incrustaciones y ensuciamiento | 89 |
| V.11. Determinación de purgas continuas o periódicas a realizar en los Condensadores Evaporativos | 89 |
| CAPÍTULO VI: Presentación y Discusión de los Resultados de las Evaluaciones realizadas. | 90 |
| VI.1. Resultados del caudal de agua evaporada estimado en los condensadores evaporativos antes de realizar el tratamiento desincrustante | 90 |
| VI.2. Resultados de las Pruebas de laboratorio para el Tratamiento Desincrustante | 94 |
| VI.3. Resultados del caudal de agua evaporada estimado en los condensadores evaporativos luego del Tratamiento Químico Desincrustante | 101 |
| VI.4. Evaluación de la capacidad de los suavizadores empleados para las calderas, para alimentar los condensadores evaporativos | 104 |
| VI.5. Evaluación de la alimentación a los condensadores usando agua suave o una mezcla entre agua suave y agua dura. | 107 |
| VI.6. Sistemas de alimentación de agua suave a los condensadores evaporativos de Planta Nueva | 107 |
| VI.7. Resultados de los análisis de agua de las pruebas para verificar la liberación de sólidos de los tubos de los equipos | 109 |
| VI.8. Resultados del Tratamiento Mecánico realizado a los condensadores evaporativos | 113 |
| VI.9. Resultados de las pruebas del tratamiento preventivo | 115 |
| VI.10. Evaluación para la instalación de un sistema dosificador automático de productos químicos para el tratamiento preventivo de incrustaciones y corrosión | 116 |
| VI.11. Implementación de análisis de aguas como rutina en la empresa. | 118 |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 119 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 123 |
| APÉNDICES | 125 |
| APÉNDICE A: Diagrama de Presión-Entalpía para el Amoníaco | 125 |
| APÉNDICE B: Metodología para la determinación de la cantidad de agua evaporada por los condensadores Evaporativos | 126 |
| APÉNDICE C: Metodología para la determinación de las purgas continuas o periódicas a realizar en los Condensadores Evaporativos | 129 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | Página |
|---|---------------|
| Figura N°1: Esquema de una gráfica P-h mostrando los cambios de fase de un componente | 10 |
| Figura N°2: Diagrama Presión – Entalpía de un ciclo saturado simple | 11 |
| Figura N°3: Comparación entre dos ciclos saturados simples que trabajan a diferentes temperaturas vaporizantes | 19 |
| Figura N°4: Comparación entre dos ciclos saturados simples que trabajan a diferentes temperaturas de condensado. | 22 |
| Figura N°5: Diagrama P-h comparando al ciclo saturado simple con el Ciclo sobrecalentado y subenfriado. | 24 |
| Figura N°6: Enfriador de líquidos (refrigerante secundario) de tubos y Carcaza con refrigerante en el carcaza (refrigerante Principal) | 30 |
| Figura N°7: Sistema Evaporador – Compresor | 30 |
| Figura N°8: Diagrama teórico del ciclo de compresión presión – tiempo en el cual se traza la presión del cilindro contra la posición de la manivela | 32 |
| Figura N°9: Diagrama presión – volumen de un ciclo de compresión típico | 32 |
| Figura N°10: Diagrama esquemático del funcionamiento de un Condensador Evaporativo | 38 |
| Figura N°11: Efecto de la temperatura de bulbo húmedo del aire de entrada y de la temperatura de condensación en la capacidad de un condensador evaporativo | 41 |
| Figura N°12: Intercambiadores de calor empleados por los Condensadores para eliminar el sobrecalentamiento. Componente adicional de los Condensadores evaporativos | 42 |
| Figura N°13: Vista lateral derecha y lateral izquierda de un Condensador Evaporativo | 44 |
| Figura N°14: Carta psicrométrica para el aire-vapor de agua, en Unidades SI | 49 |
| Figura N°15: Carta psicrométrica para el aire-vapor de agua, en Unidades inglesas de ingeniería | 50 |
| Figura N°16: Temperatura de Bulbo Húmedo | 51 |
| Figura N°17: Gradientes de temperatura y entalpía, enfriador por evaporación | 53 |
| Figura N°18: Equipos usados para la medición de agua evaporada | 82 |
| Figura N°19: Imagen de los tubos inferiores del Condensador con incrustaciones | 82 |
| Figura N° 20: Gráfico de caudales de agua evaporada obtenidos antes de realizar el tratamiento químico desincrustante | 91 |

| | Página |
|---|--------|
| Figura N° 21: Gráfico de caudales de agua evaporada en horas de la mañana obtenidos antes de realizar el tratamiento químico desincrustante | 92 |
| Figura N° 22: Gráfico de caudales de agua evaporada en horas de la tarde obtenidos antes de realizar el tratamiento químico desincrustante | 93 |
| Figura N° 23: Gráfico de flujos de calor absorbido por el agua, obtenidos antes de realizar el tratamiento químico desincrustante | 94 |
| Figura N° 24: Soluciones con los diferentes tratamientos desincrustantes. (a) Antes de agregar las incrustaciones. (b) Durante la reacción con las incrustaciones. (c) Después de culminada la reacción. | 97 |
| Figura N° 25: Gráfico comparativo de los caudales de agua evaporada para el condensador #1, #2 y valor del fabricante del equipo, obtenidos después de realizar el tratamiento químico desincrustante. | 102 |
| Figura N° 26: Gráfico de flujos de calor absorbido por el agua en el condensador #1, #2, después del tratamiento químico desincrustante realizado | 103 |
| Figura N° 27: Variación de lo niveles de agua en los condensadores, alimentando agua suave a los mismos | 106 |
| Figura N° 28: Diagrama de Flujo del sistema de alimentación de agua suave a los condensadores evaporativos de Planta Nueva | 109 |
| Figura N° 29: Representación gráfica de la dureza total en los condensadores evaporativos después del tratamiento desincrustante | 111 |
| Figura N° 30: Representación gráfica de los sólidos totales disueltos en los condensadores evaporativos después del tratamiento desincrustante | 112 |
| Figura N° 31: Gráfico comparativo de los caudales de agua evaporada después de haber realizado el tratamiento mecánico en los condensadores | 114 |
| Figura N° 32: Resultados de las pruebas con tratamiento químico preventivo para las incrustaciones | 116 |
| Figura N° 33: Diagrama de Flujo del Sistema dosificador automático de productos químicos a los condensadores evaporativos de Planta Nueva | 117 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | Página |
|---|---------------|
| Tabla N°1: Constituyentes del agua y sus efectos | 55 |
| Tabla N°2: Características de las incrustaciones más comunes en el agua | 59 |
| Tabla N° 3: Tabla de resultados de las pruebas de los tratamientos desincrustantes para los condensadores evaporativos | 99 |
| Tabla N° 4: Evaluación de costos para el Tratamiento Químico Desincrustante | 100 |

LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

- A = Área de transferencia de calor en el condensador (L^2)
- A_c = Área de transferencia de calor en el bulbo (L^2)
- C_S = Calor Húmedo (FL/MT)
- C_A = Capacidad calorífica promedio del agua (FL/molT)
- C_B = Capacidad calorífica promedio del aire (FL/molT)
- C_p = Calor específico del medio condensante (FL/M)
- $C_{A,L}$ = Capacidad calorífica del vapor de agua en estado líquido (FL/molT)
- h_d = Entalpía específica en el punto D (FL/M)
- h_c = Entalpía específica en el punto C (FL/M)
- h_c = Coeficiente de transferencia de calor por convección (FL/L²T)
- h_r : Coeficiente de transferencia de calor por radiación (FL/L²T)
- h_a = Entalpía específica en el punto A (FL/M)
- h_{med} = altura media (L)
- H.R. = Humedad Relativa (%)
- H_A = Entalpía por masa unitaria de vapor (FL/M)
- H' = Entalpía total para la mezcla por masa unitaria del gas seco (FL/M)
- l_1 = altura inicial en el condensador (L)
- l_2 = altura final en el condensador (L)
- L = Largo de la piscina del condensador (L)
- m_{aire} = Razón de flujo de masa de aire en el condensador (M/θ)
- M_A = Peso molecular de A (M/mol)
- M_B = Peso molecular de B (M/mol)
- $P_A(t_g)$ = Presión de vapor de A, a la temperatura del bulbo seco de la mezcla (F/L²)
- P_{PA} = Presión Parcial de A (F/L²)

P_A = Presión de vapor de agua a la temperatura de la mezcla saturada (F/L²)

P_t = Presión Total del sistema (F/L²)

q_S = Calor sensible hacia el bulbo (FL/M)

q_w = Calor de compresión por unidad de masa de refrigerante circulado (FL/M)

q_c = Calor eliminado en el condensador por unidad de masa de refrigerante circulado (FL/M)

Q_c = Calor rechazado en el condensador (FL/θ)

U = Coeficiente global de transferencia de calor (FL/L²T)

t_w = Temperatura de bulbo húmedo (T)

ΔT_C = Diferencia de temperatura media logarítmica entre el refrigerante y el medio condensante (T)

ΔT = Aumento de la temperatura del medio condensante en el condensador (T)

t = Tiempo de reacción de la incrustación en la solución química (θ)

t_{evap} = Tiempo en que se evapora el agua (θ)

Y' = Humedad Absoluta (adim)

t_0 = Temperatura de referencia (T). ($t_0=0^\circ\text{C}$)

T_g = Temperatura de bulbo seco de la mezcla (T)

T_{DP} = Temperatura del punto de formación de rocío (T)

%Sat = Humedad absoluta por ciento (%)

S = Cantidad de sólidos disueltos en el agua (ppm como STD) V_H = Volumen húmedo de la mezcla (L³/M)

Δ_{DP} = Calor latente de evaporación del agua a la temperatura T_{DP} (FL/M)

% Inc. Disuelto = Porcentaje de incrustación que se disolvió en la solución (%)

Δh = Diferencia de alturas (L)

W_{evap} = Caudal volumétrico de agua evaporada (L³/θ)

W_{purga} = Caudal de agua de Purga (L/ θ)

X_{rep} = Concentración en sólidos disueltos del agua de reposición (ppm como STD)

X_{pis} = Concentración en sólidos disueltos del agua de la piscina (ppm como STD)

GLOSARIO

Bacteriostáticos: Sustancia que se caracteriza por la propiedad de evitar la reproducción de las bacterias. Las sulfamidas y la penicilina son ejemplos de bacteriostáticos.

Conductividad: Capacidad de una sustancia para conducir calor o electricidad. La conductividad eléctrica se expresa, por lo general en microohms/cm.

Depósito: Acción y efecto de acumularse sobre una superficie. Material transportado por un medio cualquiera.

Dispersante: Producto químico que hace que las partículas presentes en un sistema de agua se mantenga en suspensión.

Dosificación: Es la concentración de producto químico suministrado al sistema (ya sea inhibidor, dispersante, etc.) por unidad de tiempo.

Efecto Refrigerante: Es la cantidad de calor que cada unidad de masa de refrigerante absorbe del espacio refrigerado.

Microbiocidas: Agente físico o producto químico que mata los microbios.

Partícula Coloidal: Partículas que provocan la dispersión en un líquido, de una determinada sustancia. Los diámetros oscilan entre una milimicra y una micra, sean o no moleculares.

Temperatura de Bulbo Húmedo: Es la temperatura en estado estacionario alcanzada por una pequeña cantidad de líquido que se evapora en una gran cantidad de una mezcla vapor-gas no saturada.

Temperatura de Bulbo Seco: Es la temperatura de una mezcla vapor-gas determinada en la forma ordinaria por inmersión de un termómetro en la mezcla.

Tiempo de Residencia: Tiempo necesario para que la concentración de una superficie disuelta en el agua se reduzca en un 50%.

INTRODUCCIÓN

Actualmente, los condensadores evaporativos son equipos ampliamente usados en los sistemas de refrigeración, debido a sus bajos costos de inversión y operación, respecto a otros equipos similares, y son más compactos.

En la industria, los sistemas están sujetos a operaciones continuas y a determinadas condiciones, que por lo general, son muy variantes. De allí, la importancia de mantener y alargar la vida útil de dichos sistemas. En el caso particular de los condensadores evaporativos, estos presentan inconvenientes si durante su funcionamiento no se crean las condiciones más adecuadas para la alimentación del agua, ya que ésta afectaría el proceso de transferencia de calor por la presencia de sólidos adheridos a los tubos.

En la Industria Alimenticia Corralito (INACOR), se presentó un problema con incrustaciones en los Condensadores de Planta Nueva, generado por el uso inadecuado del agua y por la falta de tratamientos preventivos en los mismos.

Es por esto, que con la finalidad de recuperar la transferencia de calor en estos equipos, se planteó como objetivo principal en este Trabajo Especial de Grado, mejorar el funcionamiento de los Condensadores Evaporativos del Sistema de Refrigeración Industrial en Planta Nueva, con respecto a las incrustaciones externas de los tubos del serpentín.

Las incrustaciones son formaciones de sólidos duros que se adhieren a los tubos del serpentín y a las paredes de los equipos, generando una disminución en la efectividad del sistema. Para poder eliminarlas se pueden aplicar dos tipos de tratamientos: los tratamientos químicos y el mecánico.

Antes de realizar cualquiera de estos tratamientos, es necesario considerar los diferentes aspectos que intervienen. En este caso, para verificar el efecto del tratamiento aplicado se evaluó la cantidad de incrustaciones que presentaban los equipos a partir de una metodología teórica-práctica donde se mide el caudal de agua evaporada en los condensadores. Una vez hecha la evaluación, se realizaron los tratamientos que se consideraron más adecuados. Finalmente, se puso en marcha todo un tratamiento preventivo, desde el tipo de agua a utilizar, productos químicos a alimentar, caudales de purgas y análisis de aguas a realizar, para así evitar la nueva formación de incrustaciones en estos condensadores evaporativos.

Para el desarrollo de estos tratamientos preventivos y desincrustantes, se elaboraron variedad de pruebas y mediciones in situ, así como análisis de agua en el laboratorio de la empresa, de manera de establecer comparaciones y conclusiones del trabajo realizado, y para tomar decisiones definitivas sobre el mantenimiento a realizar.

Una vez culminadas todas las pruebas, análisis, mediciones y estimaciones sobre los condensadores, se establecieron una serie de conclusiones y recomendaciones que permitieron mejorar notablemente el buen funcionamiento de los Sistemas.

CAPÍTULO I

FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN

En este capítulo se presentan los fundamentos que motivaron la realización de esta investigación, abarcando el planteamiento del problema y los objetivos, generales y específicos, establecidos en este trabajo.

I.1. Planteamiento del Problema

A través del tiempo, la refrigeración a presentado un crecimiento asombroso. En la mayoría de las industrias, la refrigeración ocupa un espacio considerable debido al amplio campo de aplicaciones. Este crecimiento abrupto se debió, entre otras cosas, al desarrollo de equipos más pequeños y eficientes y al avance en refrigerantes “seguros”. La refrigeración es ampliamente utilizada en distintas áreas, algunas de las cuales son: la refrigeración doméstica (refrigeradores y congeladores), comercial, industrial, marina y de transportación y en el acondicionamiento de aire.

En la gran mayoría de los procesos industriales alimenticios, el uso de sistemas de refrigeración es muy común y de gran importancia, ya que estos permiten la preservación o conservación de los productos. Para el caso particular de Industria Alimenticia Corralito (INACOR), la refrigeración es empleada en cavas (refrigeración y congelación), acondicionamiento de aire y fabricación de hielo, siendo los dos primeros los de mayor importancia.

Por tal razón, el Departamento de Térmica de la empresa ha prestado especial atención en el mejoramiento y cuidado de dichos sistemas debido a la disminución de efectividad y al notable aumento de las temperaturas en

los compresores, originando condiciones inadecuadas en los equipos de Planta.

Partiendo de esto, el Ingeniero encargado procedió a la exhaustiva inspección de los Condensadores Evaporativos de Planta Nueva, observando que los tubos internos del equipo estaban cubiertos en gran parte por una capa sólida dura llamada incrustación, lo que impedía la transferencia de calor eficiente entre el amoníaco y el sistema agua-aire.

Es por esto, que se propuso el estudio completo de los condensadores ubicados en Planta Nueva, comenzando con el planteamiento de un método práctico que permita estimar el nivel de incrustaciones que presenta el equipo, el cual fue empleado como indicativo del estado inicial del condensador, al igual que en el momento de realizar tratamientos químicos y/o mecánicos sobre el mismo.

Una vez conocido el nivel de incrustaciones, se procedió a realizar tratamientos químicos correctivos y se instaló un sistema de alimentación de agua y uno dosificador de producto, a fin de prevenir nuevas incrustaciones en el sistema.

Para llevar a cabo tales estudios, se contó con equipos e instrumentos de laboratorio para realizar mediciones del tiempo y la altura del nivel de agua en el condensador, para poder así, determinar la cantidad de agua se evapora en los mismos. Además, se midieron temperaturas de bulbo húmedo y bulbo seco a la entrada y salida de los equipos, para estimar la cantidad de calor eliminado en el condensador. Por otra parte, se hicieron pruebas con los distintos productos químicos desincrustantes y para tratamiento preventivo, de manera de escoger los productos más efectivos y económicos a utilizar.

Por otra parte, se estudió el sistema de flujo para la alimentación de agua suave y para la dosificación de productos químicos para el tratamiento preventivo permanente, con el objetivo de instalar y/o modificar las tuberías y bombas necesarias para el correcto funcionamiento del mismo.

Todas estas evaluaciones, establecieron mejoras en la operación de los Condensadores, lo que se tradujo en temperaturas más adecuadas en las cavas, y en las áreas de producción, lo que a su vez se reflejó en menos costos y mayor calidad en los productos finales.

I.2. Objetivos

De acuerdo con lo dispuesto anteriormente, se propone como fin de la investigación un objetivo general, y una serie de objetivos específicos que permiten alcanzar el objetivo principal del proyecto.

I.2.1. General.

- ✚ Mejorar el funcionamiento de los Condensadores Evaporativos de Planta Nueva en el sistema de refrigeración industrial de la Industria Alimenticia Corralito, respecto a las incrustaciones externas de los tubos, y establecer diferentes propuestas para mantener la vida útil de los Condensadores.

I.2.2. Específicos.

- ✚ Determinación del caudal de agua evaporada que presentan los condensadores evaporativos, empleando una metodología experimental a fin de evaluar las incrustaciones en los mismos.

- ✚ Evaluación de la eficacia de distintos productos químicos empleados en los condensadores, a partir de pruebas realizadas en el laboratorio de la empresa, y de un estudio de costos de los diferentes productos.
- ✚ Implementar la utilización de agua suave en la alimentación a los condensadores, evaluando para ello las diversas opciones que se presenten, considerando la economía y la factibilidad que esto conlleva.
- ✚ Poner en práctica la metodología de análisis del agua de purga, partiendo del uso de productos dispersantes de sólidos y formadores de lodos, así como inhibidores y alguicidas.
- ✚ Establecer recomendaciones respecto al tratamiento químico preventivo de incrustaciones y corrosión a utilizar en los condensadores.
- ✚ Establecer recomendaciones fundamentales sobre las purgas que se deben realizar en los equipos.

CAPÍTULO II

SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN

II.1 Refrigeración

La refrigeración se define como cualquier proceso de eliminación de calor. Más específicamente, como la rama de la ciencia que trata con los procesos de reducción y mantenimiento de la temperatura de un espacio o material a temperatura inferior con respecto de los alrededores correspondientes (Dossat, 1998).

Para lograr esto, debe sustraerse calor del cuerpo que va a ser refrigerado y ser transferido a otro cuerpo cuya temperatura es inferior a la del cuerpo refrigerado. Adicionalmente puede ocurrir, que en este proceso de transferencia, el calor retirado puede ser empleado por el otro cuerpo para llevar a cabo el cambio de fase de este último, dependiendo esto del gradiente de temperatura que allí intervenga. Para la producción de temperaturas inferiores a la atmosférica sólo tiene interés industrial el procedimiento con cambio de fase, y más concretamente, la evaporación de un líquido a baja temperatura; el efecto de calor se debe al calor absorbido al evaporarse (Vian, 1967).

La refrigeración tiene diversas aplicaciones, entre las que se tienen: (1) refrigeración doméstica (refrigeradores y congeladores), (2) refrigeración comercial (restaurantes, hoteles e instituciones), (3) refrigeración industrial (empresas de alimentos, bebidas, refinerías, químicas, etc), (4) refrigeración marina y de transportación (alimentos que se transportan en barcos y equipos para el traslado de productos), y (5) Acondicionamiento de aire

(control de temperatura, humedad y movimiento de aire en un espacio determinado).

Un refrigerante es cualquier cuerpo o sustancia que actúa como agente de enfriamiento absorbiendo calor de otro cuerpo o sustancia. Usualmente se utiliza un ciclo compresión-vapor, en el cual el refrigerante es el fluido de trabajo del ciclo el cual cíclicamente se vaporiza y se condensa absorbiendo y cediendo calor, respectivamente.

Emplear agua como fluido refrigerante depende del sistema que se vaya a utilizar, debido a que las condiciones de presión y temperatura de saturación del sistema, por lo general, son elevadas. Es por esto, que el agua no es muy apropiada para usarla como refrigerante en un sistema de refrigeración, debido a que se tendría que vaporizar el agua a temperaturas y presiones muy bajas, las que causarían altos costos de producción.

Existen diversidad de refrigerantes a usar en un ciclo de refrigeración, pero muchos de estos refrigerantes presentan propiedades que hacen su uso inadecuado. En realidad, son muy pocos los fluidos que son apropiados para utilizarlos como refrigerantes; para poder usar un determinado refrigerante, éste debe presentar propiedades químicas, físicas y termodinámicas que se ajusten en forma adecuada a las necesidades deseadas en dicha aplicación, y que su uso sea seguro y económico.

Propiamente no existe un refrigerante “ideal” y por las grandes diferencias en condiciones y necesidades, es imposible contar con un tipo de refrigerante que sea universal para todo tipo de proceso. Entonces, un refrigerante se aproximará al “ideal”, tanto como sus propiedades satisfagan las condiciones y necesidades para los cuales van a ser utilizados.

En este estudio se empleará como fluido refrigerante amoníaco, el cual es el único refrigerante, fuera del grupo de los fluorocarburos, que se usa bastante en la actualidad. Aunque el amoníaco es tóxico, algo inflamable y explosivo bajo ciertas condiciones, sus excelentes propiedades térmicas lo hacen ser un refrigerante ideal para gran cantidad de industrias, donde se cuenta con servicios y personal experimentado y donde su naturaleza tóxica es de baja consecuencia.

En el estudio de los sistemas de refrigeración existe una herramienta muy útil que permite analizar procesos particulares, así como las relaciones que existen entre los diferentes procesos, y los efectos que un cambio en uno de los procesos del ciclo tendría en los demás procesos, siendo esta herramienta los diagramas de presión – entalpía (P-h) y de temperatura – entropía (T-s). Los diagramas de presión – entalpía son los más utilizados a nivel general.

En el proceso de refrigeración, el refrigerante circula a través del sistema pasando por un número de cambios en su estado o condición, los cuales pueden ser fácilmente identificados en diagramas de presión – entalpía, para su directa interpretación. El refrigerante empieza en algún estado o condición inicial, pasa a través de una serie de procesos en una secuencia definida y regresa a su condición inicial, formando lo que se llama un ciclo (Dossat, 1998).

En la figura N°1 se muestran tres áreas, separadas una de otra por las líneas de líquido saturado y vapor saturado. El área sobre la gráfica que está en la parte izquierda de la línea de líquido saturado, se le llama región subenfriada. Para cualquier punto en esta región, el refrigerante está en la fase líquida y su temperatura es menor a la de saturación correspondiente a su presión. El área que está a la derecha de la línea de vapor saturado es la

región de sobrecalentamiento y el refrigerante está en forma de vapor. La sección del diagrama comprendida entre las líneas de líquido y vapor saturado es la región de mezclas y representa el cambio de fase del refrigerante entre las fases líquidas y de vapor. A partir de valores de entalpía leídas en la parte inferior del diagrama, se puede obtener el calor latente de vaporización del refrigerante a una determinada presión.

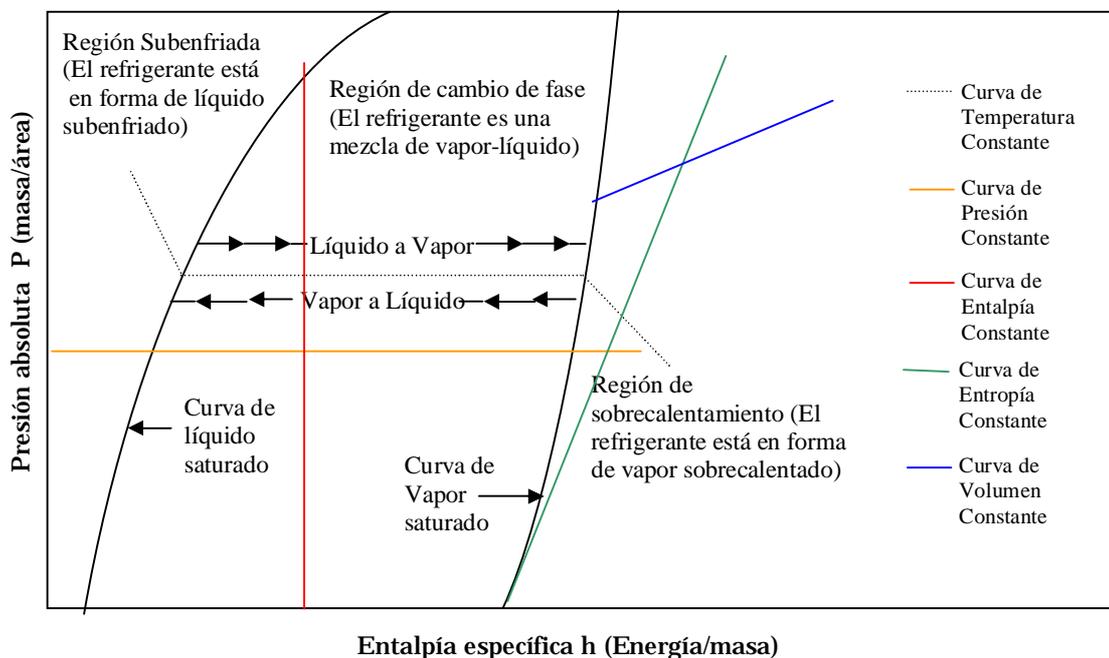


Figura N°1: Esquema de una gráfica P-h mostrando los cambios de fase de un componente.

Los valores de cualquiera de las diferentes propiedades del refrigerante (presión, temperatura, entalpía, entropía y volumen), y que son importantes en el ciclo de refrigeración pueden leerse en forma directa en el diagrama P-h, desde cualquier punto de donde podrá obtenerse el valor de alguna propiedad que resulte ser muy importante para el proceso.

II.2. Etapas de la Refrigeración.

En el ciclo de refrigeración simple consta de cuatro procesos fundamentales: (1) expansión, (2) vaporización, (3) compresión y (4) condensación, los cuales serán explicados con mayor detalle a continuación. En la figura N°2 se presenta el diagrama de presión – entalpía para un ciclo saturado simple, lo que permite visualizar fácilmente las etapas de la refrigeración.

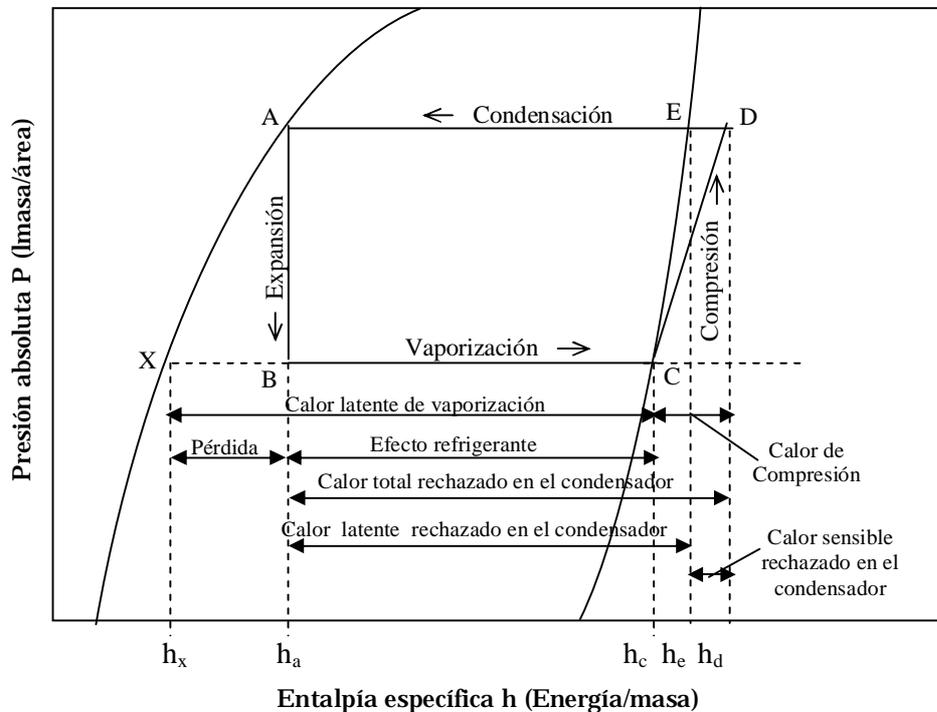


Figura N°2: Diagrama presión-entalpía de un ciclo saturado simple.

II.2.1. Proceso de Expansión.

El líquido refrigerante a alta temperatura y presión, fluye desde el condensador hacia el tanque receptor (proceso AB), reduciendo la presión hasta la presión de trabajo del evaporador, de manera que la temperatura de

saturación del refrigerante que llega al evaporador hará disminuir la temperatura del espacio refrigerado. En este instante, en que el líquido pasa a través del tanque y reduce su temperatura y presión, parte de éste se vaporiza quedando una mezcla de líquido-vapor.

En algunos sistemas se emplean evaporadores centrales (Chillers), donde la válvula utilizada realiza una función de control de caudal del refrigerante, aunque siempre existe alguna expansión irreversible (estrangulación) debido a la diferencia de presión entre las que trabaja.

La presión dentro del evaporador central (chillers) es mantenida lo suficientemente baja para producir la evaporación del refrigerante líquido presente en el chiller, bajando la temperatura del líquido debido al calor latente que cede al vapor durante su evaporación (proceso BC), ver figura N°2.

En el momento en que el líquido es expandido en el chiller por medio de la baja presión que produce la succión del compresor, se disminuye la temperatura del líquido desde la temperatura condensante hasta la temperatura evaporante, y de inmediato una parte del líquido pasa a ser vapor.

En este proceso de expansión que ocurre en la válvula para una parte del líquido refrigerante, la entalpía del fluido no cambia durante el proceso. Se supone que esto ocurre sin ganancia ni pérdida de calor a través de válvulas o tuberías y sin la realización de un trabajo. Este se encuentra dentro del área de mezcla líquido-vapor, como resultado de la vaporización parcial del refrigerante. Las magnitudes de los segmentos XB y BC permiten estimar que parte del refrigerante pasó a vapor "XB" y que parte se mantiene como líquido "BC".

Si bien no existe un cambio de entalpía en el proceso de expansión por la ausencia de transferencia de calor entre los alrededores y los fluidos, si existen variaciones en la entropía causadas por una transferencia de calor en el mismo fluido.

II.2.2. Proceso Vaporizante.

La vaporización se efectúa a temperatura y presión constantes, por lo que el proceso B-C es tanto isotérmico como isobárico. En el punto C, el refrigerante se encuentra totalmente vaporizado, presentándose en estado de vapor saturado.

En la medida que el refrigerante líquido que permanece en el chiller se evapora por la baja presión que mantiene la succión del compresor, la temperatura del refrigerante líquido disminuye por el calor latente que entrega a la fracción que se evapora.

Este refrigerante líquido en el chiller (refrigerante primario) se encuentra cubriendo enteramente un intercambiador tubular por el que circula el líquido refrigerante secundario (Etilenglicol). De esta manera, al evaporarse el refrigerante primario (amoníaco) en el chiller, enfría al refrigerante secundario que circula por el interior de los tubos del intercambiador.

A diferencia de lo que ocurre en un evaporador convencional que usa una válvula de estrangulación, en el chiller los puntos X, B y C coexisten en tiempo y espacio. En un condensador convencional en el que se utiliza una válvula de estrangulación, la evaporación del refrigerante va progresando a lo

largo del tubo en la medida de que el refrigerante va ganando calor y por tanto evaporándose.

II.2.3. Proceso de Compresión.

El proceso C-D se efectúa en el compresor a medida que se incrementa la presión del vapor debido a la compresión desde la presión vaporizante hasta la compresión condensante (Dossat, 1998).

El vapor resultante de la vaporización es sacado del chiller por el tubo de succión hasta la succión de entrada del compresor. Este vapor está saturado y tiene la misma presión y temperatura que la del líquido vaporizante. El proceso de compresión se lleva a cabo de manera isoentrópica, siendo este un proceso a entropía constante, adiabática que ocurre idealmente sin fricción.

Una vez que el vapor se encuentra dentro del compresor, la temperatura y la presión son aumentadas debido a la compresión. El vapor de alta presión y alta temperatura, es descargado en el tubo de gas caliente. Luego de que el vapor pasa por el compresor, es dirigido por tuberías hacia el condensador.

Durante el proceso de compresión adiabático, se aumenta la entalpía del gas en una cantidad igual a la cantidad de trabajo efectuado sobre el gas al comprimirlo, debido al incremento en la temperatura y en la presión del vapor en la medida que se va realizando el trabajo. El trabajo efectuado es una función de la relación de presiones entre la que trabaja el compresor.

Una condición muy importante que se debe conocer, en todo momento en el proceso de refrigeración, es la temperatura en la descarga, ya que ésta

representa la temperatura a la cual es descargado el vapor del compresor. El conocimiento de esta temperatura permite estimar el comportamiento del sistema, es decir, cómo está funcionando el condensador y el chiller o evaporador. Si la temperatura y la presión de descarga aumentan se puede interpretar como que el refrigerante no está retirando el calor suficiente del fluido a enfriar, y las temperaturas que alcanza son mayores a las requeridas. A su vez, en el condensador se puede presentar que las temperaturas a las que se enfría el líquido refrigerante son mayores a las requeridas.

Por otra parte, este aumento en la temperatura en la descarga del compresor permite inducir ensuciamiento de los equipos, reduciendo así la transferencia de calor entre los fluidos.

Se le llama calor de compresión a la energía equivalente al trabajo efectuado sobre el vapor para comprimirlo y, la energía para efectuar dicho trabajo es suministrada por un impulsor al compresor (Dossat, 1998). Este calor se representa como las diferencias de entalpía del refrigerante entre los puntos D y C. El trabajo (Calor) de compresión por unidad de masa de refrigerante circulado (q_w) es representado de la siguiente manera, considerando las entalpías específicas del proceso correspondiente (h_d y h_c),

$$q_w = h_d - h_c \quad (1)$$

Como resultado de la absorción de calor en la compresión, el vapor descargado por el compresor está en la condición de sobrecalentado o sea, su temperatura es mayor que la temperatura de saturación correspondiente a su presión. Antes de que el vapor sea condensado debe eliminarse el sobrecalentamiento del vapor bajando la temperatura del vapor descargado hasta la temperatura de saturación correspondiente a su presión (Dossat, 1998).

II.2.4. Proceso de Condensación.

El vapor descargado es enfriado hasta la temperatura de saturación (para condensarlo) a medida que este fluye a través del tubo de gas caliente y de la parte superior del condensador, después de lo cual la eliminación posterior de calor del vapor produce la condensación a la temperatura de saturación correspondiente a la presión a la que se encuentra el condensador.

Por lo general, tanto los procesos D-E como E-A se llevan a cabo en el condensador en la medida que el gas caliente descargado del compresor es enfriado hasta la temperatura condensante y después condensado. La cantidad de calor sensible (sobrecalentamiento) eliminado por unidad de masa de vapor en el condensador al enfriarse desde la temperatura de descarga hasta la condensante, es la diferencia de entalpías específicas del refrigerante entre los puntos D y E ($h_d - h_e$).

La temperatura del condensante se define como la temperatura a la cual el vapor se condensa en el condensador, y es la temperatura del vapor correspondiente a la presión que se tiene en el condensador. En el caso de la presión del condensante, ésta corresponde a la presión de saturación de la mezcla vapor-líquido a la temperatura del condensador (Dossat, 1998).

El proceso E-A es la condensación del vapor. El calor cedido al medio condensante durante este proceso es la diferencia de entalpías del refrigerante entre los puntos E y A ($h_e - h_a$).

Debido a que ambos procesos D-E y E-A se verifican en el condensador, el calor total retirado es la suma de las cantidades de calor

eliminadas durante ambos procesos. El calor total cedido por el refrigerante es la diferencia entre las entalpías del vapor sobrecalentado en el punto D y el líquido saturado en el punto A, es decir,

$$q_c = h_d - h_a \quad (2)$$

donde q_c es el calor eliminado en el condensador por unidad de masa de refrigerante circulado.

Para tener un efecto refrigerante continuo, el vapor refrigerante debe ser condensado en el condensador a la misma velocidad que el líquido refrigerante es vaporizado en el chiller. Esto quiere decir que debe eliminarse calor del sistema a través del condensador en la misma proporción que el sistema toma calor en el evaporador y tubo de succión y, en el compresor como resultado del trabajo de compresión. Es evidente, que cualquier aumento que se tenga en la velocidad de vaporización producirá un aumento en el calor transferido en el condensador (Dossat, 1998).

La velocidad a la cual fluye el calor del vapor refrigerante por las paredes del condensador hacia el medio condensante es función de cuatro factores: (1) el área de la superficie condensante; (2) la conductividad térmica de las paredes de los tubos del condensador; (3) el coeficiente de convección respecto al refrigerante y el correspondiente al medio condensante; y (4) la diferencia de temperatura entre el refrigerante y el medio condensante. Para cualquier condición dada, el área de la superficie condensante y el coeficiente de conductividad térmica son fijas de tal manera que la velocidad de transferencia de calor depende sólo de la diferencia de temperatura entre el vapor refrigerante y el medio condensante.

Se puede acotar que la temperatura del fluido condensante varía directamente con la temperatura del medio condensante y con la velocidad requerida de la transferencia de calor en el condensador.

II.3. Ciclo de Refrigeración Saturado Simple

Un ciclo de refrigeración saturado simple es un ciclo teórico en el que se supone que el vapor refrigerante que sale del evaporador y entra al compresor es vapor saturado, a la temperatura y presión vaporizante, y el líquido refrigerante que sale del condensador y llega al tanque receptor del refrigerante es un líquido saturado a la temperatura y presión del condensante. En este ciclo, los procesos fundamentales son la base para entender e identificar con facilidad el ciclo de refrigeración real. La figura N°2 permite distinguir las etapas de un ciclo saturado simple.

En el ciclo de saturación simple se ha supuesto que no hay ningún cambio en las propiedades o condición del líquido refrigerante a medida que éste fluye a través de la tubería desde el condensador hasta el tanque receptor del refrigerante, y la condición del líquido a la entrada de dicho tanque es la misma condición que se tiene en el punto A, de la figura anterior (figura N°2). En este tipo de ciclo, se supone que el refrigerante no cambia de condición mientras está fluyendo por la tubería de succión desde el chiller hasta el compresor.

En un ciclo saturado simple, la energía del refrigerante se incrementa en sólo dos puntos en el ciclo: (1) el calor absorbido por el fluido refrigerado a medida que se vaporiza el refrigerante en el chiller (q_e) y, (2) la energía debido al trabajo mecánico realizado por el compresor (q_w).

II.3.1. Efecto de la Temperatura de Succión en la Eficiencia del Ciclo.

La eficiencia del ciclo de refrigeración depende en gran medida tanto de la temperatura condensante como de la vaporizante, siendo esta última la que produce mayor efecto. Este efecto puede ser fácilmente entendido a partir de un diagrama de presión-entalpía, mostrado en la figura N°3. En esta figura se presentan dos ciclos saturados simples trabajando a diferentes temperaturas vaporizantes. En el diagrama se muestran valores de entalpías de manera de facilitar la comparación entre los ciclos.

Uno de los ciclos está identificado por los puntos A, B, C, D y E, trabajando a una temperatura vaporizante y a una temperatura condensante. En los puntos A, B', C', D' y E, se tiene un ciclo similar que tiene la misma temperatura condensante, pero que está trabajando a una temperatura vaporizante diferente.

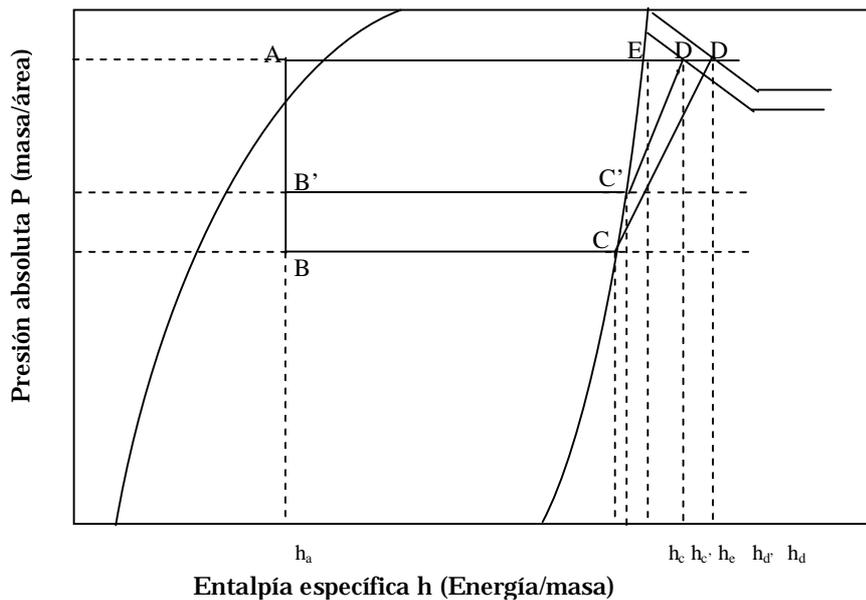


Figura N°3: Comparación entre dos ciclos saturados simples que trabajan a diferentes temperaturas vaporizantes.

Si se comparan ambos ciclos, se observa que el efecto refrigerante (cantidad de calor que cada unidad de masa de refrigerante absorbe del espacio refrigerado) por unidad de masa refrigerante es mayor para el ciclo que tiene la mayor temperatura vaporizante.

El hecho de tener un mayor efecto refrigerante por unidad de masa de refrigerante circulado es debido a que se tiene un diferencial menor de temperatura entre la temperatura vaporizante y la del líquido que llega a la válvula de control. En consecuencia, a mayor temperatura de succión, se vaporizará una fracción menor del refrigerante en la válvula de control y una mayor parte se vaporizará en el chiller para producir el enfriamiento útil (Dossat,1998).

En relación con el trabajo de compresión por unidad de masa necesario para comprimir al vapor desde la presión vaporizante hasta la presión condensante es menor para el ciclo de temperatura más alta, considerando que la diferencia entre las presiones vaporizante y condensante es pequeña para el ciclo de alta temperatura en la succión. A partir de esto, se puede deducir que el calor de compresión por unidad de masa para el ciclo que tiene la temperatura de vaporizante más alta es menor respecto al de menor temperatura. La cantidad de calor absorbido en el condensador es mucho menor para el ciclo que tiene la mayor temperatura vaporizante. Esto es cierto aún cuando este calor absorbido es muy similar para ambos ciclos.

Finalmente, se puede concluir que la cantidad de calor absorbido en el condensador es menor para el caso de temperatura de succión mayor debido a las dos siguientes razones: (1) la menor razón de flujo de masa y (2) al menor calor de compresión por unidad de masa.

El aumento de la temperatura vaporizante trae consigo un aumento del efecto refrigerante y disminución del calor de compresión, provocando que la cantidad de calor por unidad de masa absorbido sea casi igual para ambos ciclos (Dossat, 1998).

II.3.2. Efecto de la Temperatura Condensante en la Eficiencia del Ciclo.

Si la temperatura vaporizante permanece constante, disminuiría la eficiencia del ciclo al aumentarse la temperatura condensante. En la figura N°4 se presenta dos ciclos saturados diferentes, trabajando a temperaturas condensantes distintas. Por medio de este diagrama se puede observar el efecto de la temperatura condensante sobre el ciclo de refrigeración. Uno de los ciclos es el A, B, C, D y E el cual tiene una temperatura condensante, mientras que el otro es el A', B', C, D' y E', y trabaja con una temperatura condensante mayor.

En la medida en que la temperatura condensante se vea incrementada, se aumenta también la temperatura que llega a la válvula de control del refrigerante y se reduce el valor del efecto refrigerante por unidad de masa. De acuerdo con esto, la razón de flujo de masa del refrigerante por capacidad unitaria debe ser mayor.

Por otra parte, cuando aumenta en porcentaje el volumen del vapor manejado por el compresor, éste es exactamente igual al porcentaje de aumento de la razón de flujo de masa.

Debido a que es grande la diferencia entre los valores de las presiones vaporizante y condensante, el trabajo de compresión del refrigerante

circulado será también mayor para el ciclo que tenga la mayor temperatura condensante.

En resumen, debido a que la capacidad y la eficiencia de un sistema refrigerante se mejoran con notoriedad a medida que es aumentada la temperatura en el evaporador, resulta evidente que un sistema de refrigeración deberá diseñarse siempre para que trabaje a la temperatura práctica más alta en el evaporador. A pesar de que la temperatura condensante causa efecto sobre la capacidad y la eficiencia del ciclo, en menor grado que la del evaporador, no debe conservarse en un valor tan bajo que resulte no ser práctico.

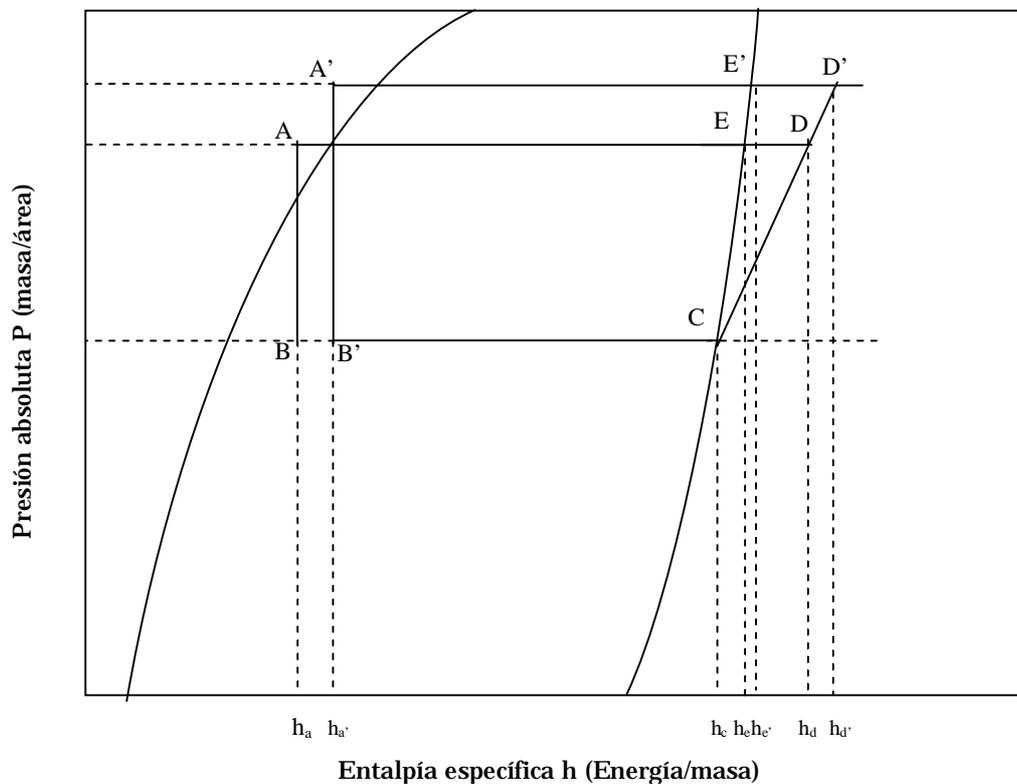


Figura N°4: Comparación entre dos ciclos saturados simples que trabajan a diferentes temperaturas de condensado.

II.4. Ciclos Reales de Refrigeración

Los ciclos reales de refrigeración divergen del ciclo saturado simple, debido a ciertas consideraciones que se hacen en el ciclo saturado que no se hacen en el ciclo real, siendo algunas de estas, que se desprecia la caída de presión que experimenta el fluido al paso por tuberías, evaporador, condensador en un ciclo saturado simple; que no se considera el subenfriamiento del líquido ni el sobrecalentamiento del vapor en la tubería de succión; además, se supone que la compresión es isoentrópica.

II.4.1. Efecto del Sobrecalentamiento en el Vapor de Succión.

En un ciclo saturado simple, el vapor de la succión en el compresor se supone que está como vapor saturado a la temperatura y presión vaporizante. Después de que el líquido refrigerante es vaporizado en el chiller, el vapor saturado continúa absorbiendo calor volviéndose sobrecalentado cuando llega al compresor.

Sobre el diagrama P-h que se presenta en la figura N°5 se compara un ciclo saturado simple (puntos A, B, C, D y E), con otro en el cual el vapor de la succión se encuentra sobrecalentado desde T1 hasta T2 (puntos A, B, C', D' y E). Despreciando la caída de presión del vapor en la tubería de succión, puede suponerse que la presión del vapor permanece constante durante el sobrecalentamiento. Es decir, que después del sobrecalentamiento, la presión del vapor en la succión a la entrada del compresor es la misma que la presión vaporizante en el chiller.

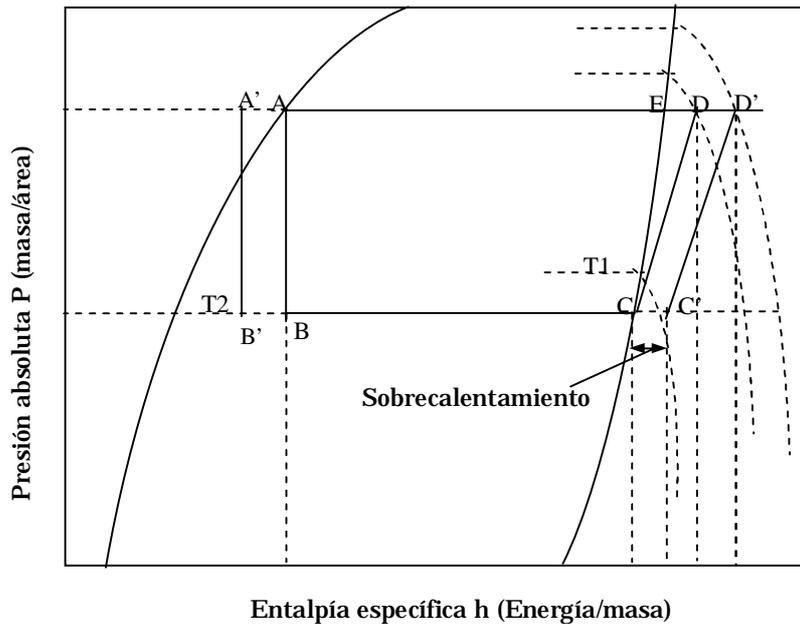


Figura N°5: Diagrama P-h comparando al ciclo saturado simple con el ciclo sobrecalentado y subenfriado.

En la figura N°5, el proceso C-C' representa el sobrecalentamiento del vapor a la presión vaporizante y el subenfriamiento del líquido condensado, la diferencia de entalpías del vapor entre dichos puntos es la cantidad de calor necesario para lograr el sobrecalentamiento y subenfriamiento del refrigerante, respectivamente.

A partir de esto, se puede establecer las siguientes comparaciones entre un ciclo saturado simple y un ciclo sobrecalentado:

1. El calor de compresión es ligeramente mayor para el ciclo sobrecalentado respecto del saturado simple
2. Para una misma temperatura y presión condensante, la temperatura del vapor descargado a la salida del compresor es mayor para el ciclo sobrecalentado que para el ciclo saturado.

3. La cantidad de calor eliminado en el condensador es mayor para el ciclo sobrecalentado debido al calor adicional absorbido por el vapor al sobrecalentarse y al pequeño incremento en el calor de compresión.

Cabe destacar, que el calor adicional que debe ser eliminado por el vapor, representa en su totalidad calor sensible. El resto del calor que presenta el vapor es calor latente, el cual es igual para ambos ciclos. Es por esto, que gran parte del calor sensible contenido en el vapor debe ser cedido al medio condensante antes de entrar al condensador, y una gran parte del condensador deberá ser utilizado para enfriar el vapor hasta la temperatura de succión.

Se debe mencionar, que por unidad de masa de refrigerante en circulación, el compresor deberá comprimir un volumen mayor de vapor si el vapor es sobrecalentado a que si es vapor saturado. Por esta razón, en cualquier caso en que se permita sobrecalentarse al vapor antes de llegar al compresor, la masa de refrigerante circulado por un compresor, siempre será menor que cuando el vapor llega al compresor en condiciones saturadas, considerando que la presión siempre es la misma.

II.4.2. Efectos de Subenfriamiento en el Líquido.

En la figura N°5 se puede observar las posibles comparaciones entre un ciclo saturado simple (puntos A, B, C, D y E) y un ciclo de líquido subenfriado (A', B', C, D y E), antes de que llegue a la válvula de control del refrigerante.

Como se puede ver en la figura, cuando el líquido es subenfriado antes que éste llegue a la válvula de control, se incrementa el efecto refrigerante

por unidad de masa. Este efecto refrigerante es representado en el diagrama por la diferencia entre h_b y h_b' , y es exactamente igual a la diferencia de valores entre h_a y h_a' , lo que representa el calor eliminado por unidad de masa de líquido subenfriado. En la medida que el efecto refrigerante aumenta, la relación de reflujo de masa refrigerante disminuye, siendo menor para el ciclo subenfriado respecto al saturado simple.

Se puede deducir que el volumen de vapor manejado por el compresor por capacidad unitaria será menor para el ciclo subenfriado que para el ciclo saturado. Además, el desplazamiento requerido en el compresor será menor para el ciclo subenfriado que para el ciclo saturado.

Por otra parte, debido a que el calor de compresión es igual para ambos ciclos, el aumento del efecto refrigerante originado por el subenfriamiento se obtiene sin aumentar el suministro de energía al compresor.

CAPÍTULO III

EQUIPOS EMPLEADOS EN EL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN

III.1. Dispositivos de Expansión

Se comenzará a describir cada uno de los equipos empleados en el Sistema de Refrigeración, siendo los dispositivos de expansión los utilizados en la primera etapa.

El dispositivo de expansión debe reducir la presión del líquido refrigerante y regula el paso del refrigerante al evaporador. Por lo general, los tipos de dispositivos comúnmente utilizados son: el tubo capilar, la válvula de expansión termostática, la válvula de flotador y la válvula de expansión a presión constante. En algunos sistemas de expansión se emplean varias de estas válvulas por lo que se pasará a describir brevemente algunas de las nombradas anteriormente.

III.1.1. Válvula de expansión de presión constante.

Este tipo de válvula presenta una presión constante a su salida, que es la entrada al evaporador. Ésta mide la presión del evaporador y cuando ésta descende por debajo del punto de control, la válvula se abre más. Cuando la presión del evaporador sube por encima del punto de control, la válvula se cierra parcialmente (Stoecker, 1978).

III.1.2. Válvula de Flotador o Reguladores de Caudal.

La válvula de flotador mantiene al líquido a un nivel constante en un tanque. La válvula de flotador con apertura lateral inferior mantiene un nivel

constante de líquido refrigerante en el evaporador. Esta válvula permite establecer unas condiciones de flujo equilibrado entre el compresor y la válvula.

Combinaciones de válvula de flotador con apertura lateral inferior y solenoide se usan principalmente en grandes instalaciones, y pueden regular el flujo de los evaporadores de tipo inundado o de carcasa, en respuesta al nivel de líquido refrigerante en la envuelta del evaporador, o en la cámara de regulación conectada al evaporador.

III.1.3. Válvula de Expansión Termostática.

El control se realiza a partir del grado de recalentamiento del gas de admisión que sale del evaporador. Esta válvula regula el caudal de líquido refrigerante en función de la evaporación por unidad de tiempo en el evaporador.

La válvula de expansión termostática mantiene una cantidad de refrigerante casi constante en el evaporador como consecuencia del casi constante grado de recalentamiento del gas de admisión. Si la cantidad de líquido en el evaporador disminuye, habrá una mayor superficie transmisora de calor dispuesta a recalentar este gas, lo que eleva la temperatura y la presión del fluido de potencia, con lo que se abre la válvula más ampliamente y aumenta el paso de refrigerante al evaporador. Si la cantidad de líquido en el evaporador disminuye, al disminuir el recalentamiento del gas de admisión, la presión del fluido de potencia baja y la válvula se cierra.

Hay que tener presente que se obtendrá un funcionamiento incorrecto si la válvula es demasiado grande o demasiado pequeña para la instalación. Una válvula demasiado grande puede permitir que algún líquido se vierta del

evaporador al compresor. Una válvula demasiado pequeña deja insuficiente paso al líquido, y el punto de equilibrio se presenta a una baja presión de admisión, lo que reduce la capacidad del sistema.

III.2. Evaporadores o Enfriadores

Los evaporadores o enfriadores (chiller) son equipos en los que el fluido refrigerante pasa del estado líquido al de vapor, extrayendo el calor necesario del producto a enfriar. En la mayor parte de los casos, la evaporación tiene lugar sobre la superficie de los tubos cilíndricos, tanto exteriores como interiores (Dossat, 1998). En este sistema, el calor pasa desde la sustancia que se va a enfriar hasta el refrigerante en ebullición.

Uno de los diferentes tipos de enfriadores es el enfriador de líquido tipo de envuelta, en el cual el refrigerante puede estar contenido en la carcasa, y circular el líquido por los tubos, o el refrigerante puede evaporarse en los tubos circulando el líquido por la carcasa. La figura N°6 es un diagrama esquemático de este tipo de evaporador (Stoecker, 1978).

Con el refrigerante en la envuelta, éste mantiene un nivel por debajo de la parte superior de la carcasa de manera que exista suficiente superficie para separar al líquido del vapor. El fluido a enfriar circula por dentro de los tubos del serpentín.

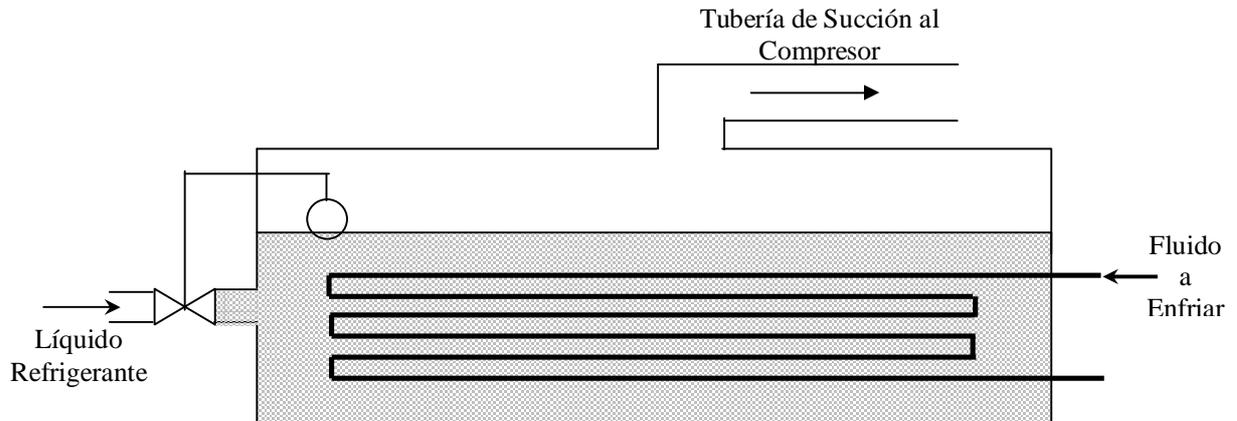


Figura N°6: Enfriador de líquidos (refrigerante secundario) de tubos y carcaza con refrigerante en la carcaza (refrigerante principal).



Figura N°7: Sistema Evaporador – Compresor.

III.3. Compresores

El compresor es el corazón del sistema de compresión de vapor. Los compresores de vapor usados en la refrigeración industrial son de tres tipos principales: (1) alternativos o recíprocos, (2) rotatorios y (3) centrífugos. De los tres, los compresores alternativos o recíprocos son los más utilizados para la refrigeración.

El compresor alternativo consiste en un émbolo o pistón que se mueve alternativamente en un cilindro que lleva dispuestas válvulas de admisión y escape para permitir que se realice la compresión y el intercambio de gases (Stoecker, 1978).

III.3.1. Ciclo de Compresión.

Las Figuras N°8 y N°9, son diagramas teóricos de presión-volumen de un ciclo de compresión teórico. Los puntos marcados con letras sobre el diagrama P-V corresponden a las posiciones del pistón.

En el punto A, el pistón está en la parte superior de su carrera, al cual se le conoce como punto muerto superior. En este punto se alcanza un “equilibrio” entre la succión y la descarga. En este momento, la presión del vapor en el cabezal del compresor es aproximadamente la misma que la del vapor en el volumen del espacio muerto, por lo que las válvulas de descarga permanecen cerradas ya sea debido a su propio peso o a la carga que ejerce sobre el resorte.

A medida que el pistón se mueve hacia atrás en la carrera de succión, se expande el vapor de alta presión que se va introduciendo en el espacio muerto.

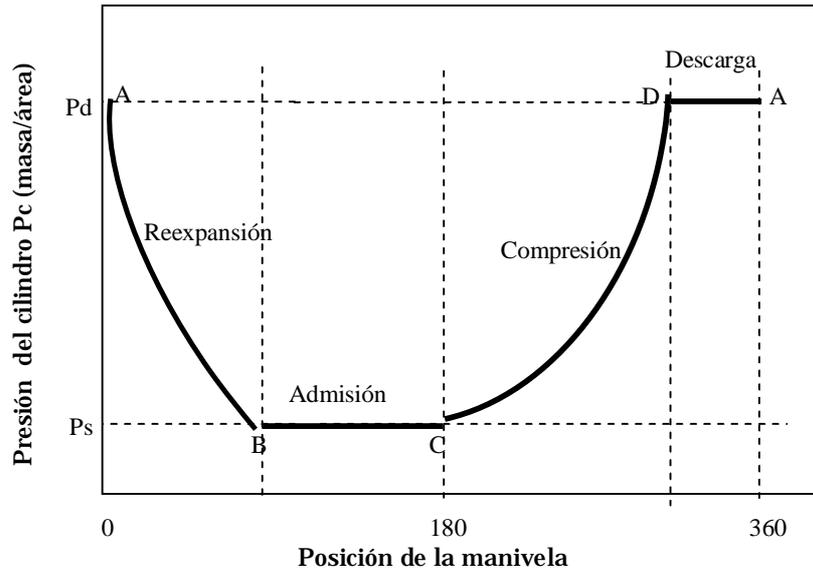


Figura N°8: Diagrama teórico del ciclo de compresión presión – tiempo en el cual se traza la presión del cilindro en función de la posición de la manivela.

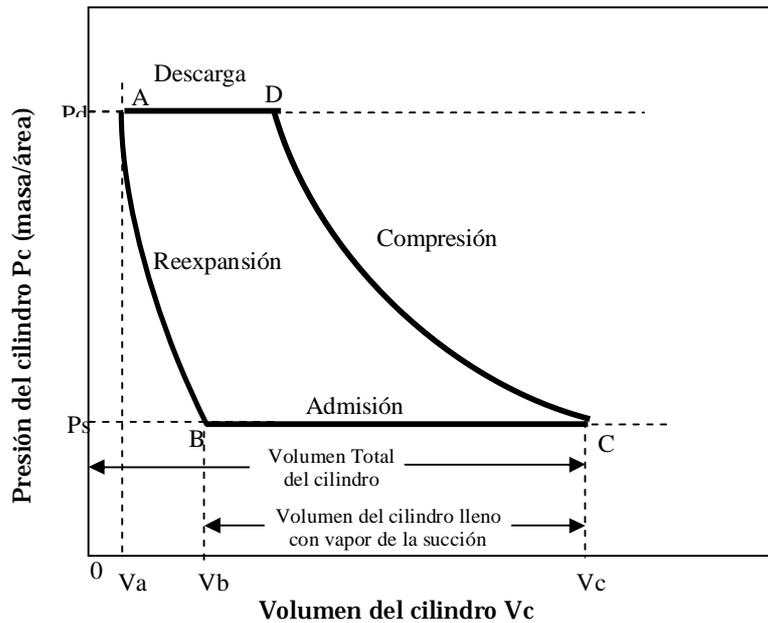


Figura N°9: Diagrama presión – volumen de un ciclo de compresión típico.

La expansión se efectúa a lo largo de la línea A-B de modo que se disminuye la presión en el cilindro a medida que se aumenta el volumen del vapor contenido en el espacio muerto. Cuando el vapor llega al punto B, la presión del vapor expandido en el cilindro, es ligeramente menor que la presión del vapor que se tiene en la tubería de succión; con lo cual las válvulas de succión se ven forzadas a abrirse por ser mayor la presión en la tubería de succión que la que se tiene en el cilindro. Durante el tiempo en que el pistón se está moviendo desde B hasta C, el cilindro se llena con vapor de succión y la presión dentro del cilindro permanece, aproximadamente, constante e igual a la presión de succión. En el punto C, se cierra la válvula de succión y comienza la carrera de compresión.

El flujo de vapor a través de las válvulas de descarga continúa hasta que el pistón se desplaza desde D hasta A mientras que la presión en el cilindro permanece constante a la presión de descarga. Cuando el pistón regresa al punto A, se completa el ciclo de compresión y el cigüeñal del compresor ha girado una vuelta completa.

III.3.2. Variación de la capacidad del Compresor con la temperatura de succión.

El rendimiento del compresor y la eficiencia del ciclo varían considerablemente con las condiciones de operación del sistema. El factor más importante que regula la capacidad del compresor es la temperatura vaporizante del líquido en el evaporador, o sea, la temperatura en la succión. Las grandes variaciones de capacidad que se presentan en un compresor se deben principalmente a la diferencia de densidades que se tiene en el vapor de succión a la entrada del compresor. A mayor temperatura vaporizante, mayor será la presión vaporizante y mayor es la densidad del vapor de la

succión. Por otra parte, para cualquier desplazamiento del pistón dado, la masa de refrigerante circulado por el compresor se aumentará a medida que se aumenta la temperatura en la succión.

III.3.3. Efecto de la temperatura condensante en la capacidad del Compresor.

Por lo general, la capacidad refrigerante del compresor disminuye a medida que la temperatura condensante aumenta. La reducción de la capacidad real del compresor puede ser atribuida a varios factores: (1) a la reducción del efecto refrigerante por unidad de masa y (2) a la reducción de la eficiencia volumétrica del compresor.

Aumentando la temperatura condensante manteniendo la temperatura en la succión constante, aumenta la relación de compresión y se reduce la eficiencia volumétrica del compresor de manera que se disminuye el volumen de vapor desplazado en el compresor. De igual manera, la masa real de refrigerante circulado disminuye manteniéndose la densidad constante.

Al aumentar la temperatura condensante se aumenta la temperatura de descarga isoentrópica. Para este caso, es interesante notar que el aumento en la temperatura de descarga isoentrópica es algo mayor que el aumento tenido en la temperatura condensante (ver figura N°4). Esto se debe, al aumento del trabajo de compresión a una relación de presión mayor.

Las temperaturas altas en la descarga no son deseables y deben evitarse en lo posible. A mayor temperatura en la descarga, mayor será la temperatura promedio en las paredes del cilindro, y mayor será el sobrecalentamiento del vapor de succión en el cilindro del compresor. Así

mismo, la temperatura alta en la descarga es adversa a la eficiencia del compresor.

III.4. Condensadores

Los condensadores, en las instalaciones frigoríficas, aseguran el cambio de fase del estado de vapor al estado líquido del fluido refrigerante, gracias a la circulación de un fluido de enfriamiento que libere hacia un medio exterior una cantidad de calor compuesta por tres fracciones:

- a. Una fracción de descenso de sobrecalentamiento del estado inicial a la temperatura de condensación.
- b. Una fracción de condensación, propiamente dicha, a temperatura constante, para los fluidos puros y mezclas azeotrópicas y a temperatura decreciente para cualquier otra mezcla.
- c. Y una fracción de subenfriamiento si se presenta el caso.

Aún cuando la salmuera o algunos refrigerantes de expansión directa se usan como medios condensantes en aplicaciones de baja temperatura, en general, para la gran mayoría de los casos, el medio condensante empleado es aire o agua o una combinación de ambos.

Los condensadores son de tres tipos generales: (1) enfriados con aire, (2) enfriados con agua y (3) evaporativos. Estos últimos emplean tanto aire como agua. A pesar de que se tiene un aumento en la temperatura del aire que está pasando a través del condensador, la condensación del refrigerante en el condensador se efectúa principalmente por la evaporación del agua rociada o atomizada sobre los tubos internos del condensador. En este caso,

la función del aire es aumentar la razón de evaporación sacando el vapor de agua que resulta del proceso de evaporación.

El calor total intercambiado en un condensador incluye tanto el calor absorbido en el evaporador como la energía equivalente del trabajo de compresión. Cualquier sobrecalentamiento absorbido por el vapor de succión del aire de los alrededores, también forma parte de la carga del condensador (Dossat, 1998).

La transferencia de calor dentro del condensador es combinada, siendo convección en la parte externa de los tubos, conducción en las paredes de los tubos del serpentín y convección en la parte interna de dichos tubos. La capacidad de transferencia de calor del condensador es función de la ecuación fundamental de transferencia de calor:

$$Q_c = A \cdot U \cdot \Delta T_c \quad (3)$$

donde Q_c : calor rechazado en el condensador (KCal/h)

A : área de transferencia de calor en el condensador (m^2)

U : coeficiente global de transferencia de calor ($W/m^2.K$)

ΔT_c : diferencia de temperatura media logarítmica entre el refrigerante y el medio condensante (K).

Tanto para los condensadores enfriados por aire como los enfriados por agua, todo el calor cedido por el refrigerante condensante, aumenta la temperatura del medio condensante. Por lo tanto, el aumento de la temperatura experimentado por el medio condensante al estar pasando a través del condensador es directamente proporcional a la carga del condensador e inversamente proporcional a la cantidad y calor específico del medio condensante o sea,

$$\Delta T = Q_c / m_{\text{aire}} \cdot C_p \quad (4)$$

donde ΔT : aumento de la temperatura del medio condensante en el condensador (K)

m_{aire} : razón de flujo de masa de aire en el condensador (kg/h)

C_p : calor específico del medio condensante (J/kg)

La temperatura promedio del medio condensante depende de la temperatura a la entrada y del aumento de la temperatura en el condensador. Debido a que esta temperatura disminuye en la medida que aumenta la razón de flujo, a mayor razón de flujo, menor será la temperatura promedio del medio condensante y menor será la temperatura condensante. La razón de flujo del medio condensante a través del condensador es fijada dentro de ciertos límites por el tamaño y diseño del condensador. Si la razón de flujo a través del condensador es muy alta, la caída de presión en el condensador será excesiva, resultando con ello que la potencia requerida para hacer circular al medio condensante, también será excesiva. Así, debido a la influencia que tiene el caudal del fluido condensante, es razonable incluir éste en la evaluación de la eficacia o efectividad de cualquier tipo de condensador.

En general, existen Condensadores Enfriados con Aire, Condensadores Enfriados con Agua, Torres de Enfriamiento y Condensadores Evaporativos.

Un condensador evaporativo es un dispositivo que tiene el mismo fin que una torre de enfriamiento, es decir, el ahorro del agua. Estos condensadores realizan simultáneamente las funciones de un condensador y de una torre de enfriamiento. El costo inicial y de operación son inferiores respecto a otros condensadores y es más compacto. Ellos pasan a reemplazar

los viejos sistemas de condensación con agua fría, el cual es obsoleto hoy día porque presenta restricciones sobre el uso limitado de agua con altos costos. El gas de escape de un compresor se condensa dentro de una batería de tubos sobre los cuales se pulveriza agua. El agua es bombeada desde el depósito inferior de la unidad hasta el cabezal de atomización. La atomización se efectúa hacia abajo pasando sobre los serpentines refrigerantes hasta el depósito inferior de la unidad. El aire es tomado del exterior por la parte inferior del condensador utilizando un soplador, el aire es descargado al exterior por la parte superior del condensador. En algunos casos, tanto la bomba como el soplador son impulsados por el mismo motor, en otros casos se usan motores separados. Ver figura N°10.

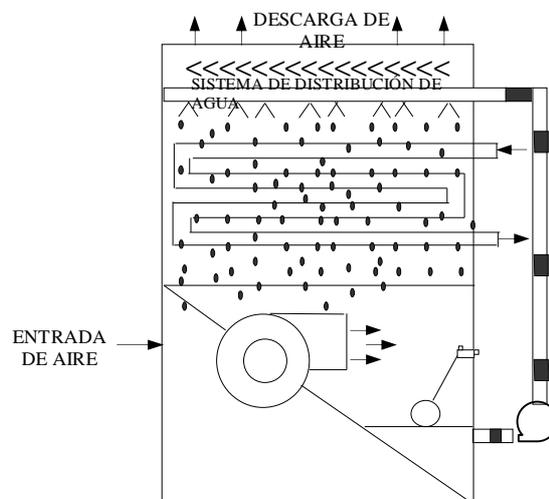


Figura N°10: Diagrama esquemático del funcionamiento de un condensador evaporativo.

Al igual que en las torres de enfriamiento, el efecto de enfriamiento en el condensador es el resultado de la evaporación de un 80% del agua cuando ésta cae a través del equipo, para la estimación de este valor se empleó como bibliografía el Dossat Roy1 1998, y un método aplicado para las torres de

enfriamiento en el Deutscher, 1968. La otra parte representa la transferencia de calor sensible del agua hacia el aire. A partir de esto se puede decir que el proceso combinado de transmisión de calor que se realiza en un condensador evaporativo es: (1) condensación del vapor refrigerante en el interior de los tubos, (2) conducción a través de la pared y aleta del tubo, (3) conducción y convección desde la superficie del tubo a la superficie exterior de la película de agua que cubre al tubo, y (4) transmisión simultánea de calor sensible y latente desde la superficie mojada a la corriente de aire. Los tres primeros procesos son únicamente de transmisión de calor sensible, siendo la temperatura la fuerza que provoca el paso de calor. El último proceso es una transmisión combinada de calor sensible y latente con la entalpía potencial (fuerza que hace pasar el calor del aire no saturado a una superficie mojada, es decir, la diferencia entre la entalpía del aire no saturado y la del aire saturado a la temperatura de la superficie mojada) como fuerza que provoca el paso del calor.

El calor para vaporizar la parte de agua que se evapora es obtenido del resto de la masa del refrigerante, de tal manera que se reduce la temperatura del refrigerante. El vapor resultante del proceso de evaporación es sacado por aire que circula a través del condensador.

Debido a que en el condensador evaporativo se realiza un proceso combinado de transmisión de calor sensible y latente, la entalpía o la temperatura de bulbo húmedo del aire que entra influye en la cantidad de calor transmitido. Por lo que, la efectividad del condensador depende en gran parte de la temperatura de bulbo húmedo del aire que entra al equipo. Mientras menor sea la temperatura de bulbo húmedo del aire que llega al condensador será más efectiva la condensación del refrigerante.

Aún cuando el proceso termodinámico real que tiene lugar en el condensador evaporativo es algo complicado, fundamentalmente es un proceso de enfriamiento evaporativo. El agua es evaporada debido a la atomización y al paso del aire a través de la superficie humedecida del condensador, siendo la fuente de calor vaporizante el refrigerante condensante en el serpentín del condensador.

En los condensadores se presentan algunos factores que influyen en las características del equipo, como son: (1) la cantidad de superficie de agua expuesta y el período (tiempo) de exposición, (2) la velocidad del aire que está pasando por medio del condensador y (3) la dirección del flujo de aire con relación a la superficie de agua expuesta. La superficie de agua expuesta está formada por: (1) la superficie del agua en el depósito del condensador, (2) todas las superficies humedecidas y (3) la superficie combinada de agua cayendo a gotitas a través del condensador.

La figura N°11 muestra el porcentaje de calor transmitido para diversas temperaturas de bulbo húmedo del aire de entrada y temperatura de condensación del amoníaco. En los condensadores estudiados se tiene que para el 100% de capacidad, unas las condiciones de 23.9°C de temperatura de bulbo húmedo del aire de entrada, y 39.5°C de temperatura de condensación. Disminuyendo la temperatura de bulbo húmedo del aire de entrada o aumentando la temperatura de condensación, aumenta la capacidad del condensador.

Generalmente, la capacidad de los condensadores evaporativos se aumenta al aumentar la cantidad de aire en circulación a través del condensador. Como una cosa práctica, la cantidad máxima de aire que puede circular a través del condensador está limitada por los requerimientos

de potencia del ventilador y por la velocidad máxima del aire que puede admitirse a través de los eliminadores de arrastre sin que se transformen en partículas de agua (Stoecker, 1978). La cantidad de agua que circule sobre el condensador deberá ser la necesaria para mantener bastante humedecida la superficie de los tubos a fin de obtener la eficiencia máxima de la superficie del tubo. Sin embargo, una razón de flujo de agua en exceso traerá como consecuencia un aumento en el suministro de potencia de la bomba sin que se aumente la capacidad del condensador.

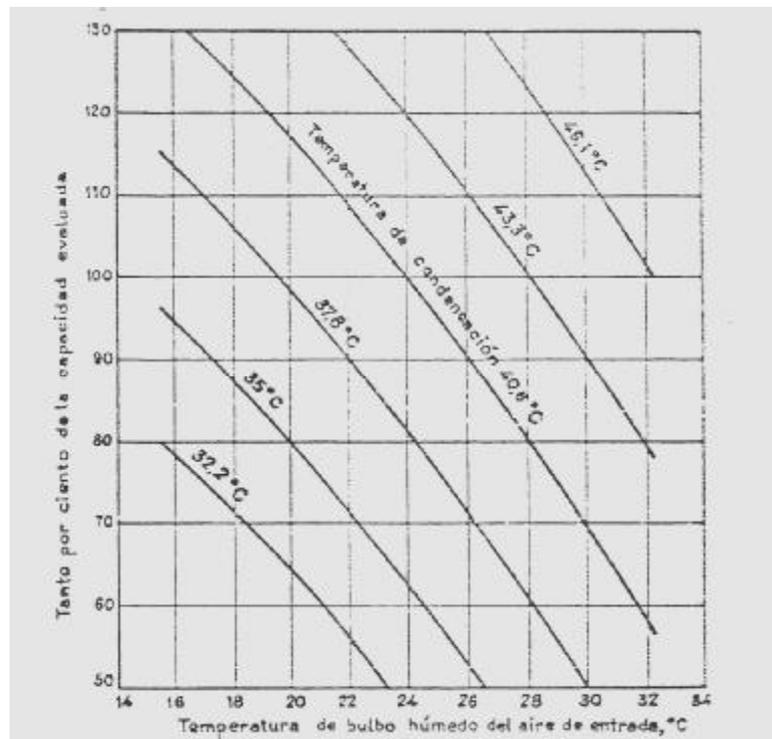


Figura N°11: Efecto de la temperatura de bulbo húmedo del aire de entrada y de la temperatura de condensación en la capacidad de un condensador evaporativo (Stoecker, 1978).

Los condensadores evaporativos están equipados con serpentines para eliminar el sobrecalentamiento, los cuales se instalan como un equipo adicional en los condensadores (ver figura N°12).

El gas caliente que sale del compresor pasa primero por medio de los serpentines de enfriamiento donde se le reduce su temperatura antes de pasar a los serpentines del condensador. Los serpentines de enfriamiento tienden a aumentar la eficiencia total del condensador y a reducir la rapidez de formación de incrustaciones en los tubos humedecidos debido a la menor temperatura. Además, aumenta la cantidad de líquido de subenfriamiento en el tanque receptor localizado en el resumidero del condensador evaporativo.



Figura N°12: Intercambiadores de calor empleados por los condensadores para eliminar el sobrecalentamiento. Componente adicional de los condensadores.

Si un sistema refrigerante está funcionando adecuada y eficientemente, la temperatura condensante debe ser mantenida dentro de ciertos límites.

Las temperaturas condensantes altas causan pérdidas en la capacidad y la eficiencia del compresor, sobrecalientan al compresor, producen consumo excesivo de potencia y en algunos casos sobrecargan al motor del compresor.

Como regla general, las temperaturas condensantes altas pueden ser debidas a una o ambas de las dos causas principales: (1) temperatura ambiente alta y (2) cargas refrigerantes grandes. Naturalmente, que el problema de temperatura condensante alta es más agudo en la temporada de sequía, cuando la temperatura ambiente y la humedad tienden a ser altas. Estos dos efectos producen el incremento de la temperatura de bulbo húmedo en el aire de entrada con la consecuente reducción de la capacidad.

Para mantener la temperatura condensante a un nivel suficientemente bajo, es necesario controlar la capacidad del condensador durante períodos en los cuales la temperatura ambiente es alta y/o la carga refrigerante es grande. Aunque los métodos empleados para controlar la capacidad del condensador varían de acuerdo al condensador usado, todos involucran variaciones ya sea de la cantidad de medio condensante circulado o de la cantidad de superficie condensante efectiva. Los dispositivos para controlar la capacidad del condensador generalmente son impulsados por controles de presión o temperatura, los cuales responden a la presión o temperatura condensante.

El control de la capacidad en un condensador evaporativo generalmente se obtiene regulando el flujo de aire que circula a través del condensador. Normalmente en la industria, se adoptan soluciones más efectivas a corto plazo para la reducción de carga, como es el caso de la disminución de carga refrigerante en la planta, realizando un control programado por tiempos, a fin de minimizar la carga del refrigerante en el condensador.

En estos equipos ocurre una transferencia de masa interfacial y de energía, que resulta cuando un gas se pone en contacto con un líquido puro, el cual es prácticamente insoluble. En este caso, la materia transferida entre las fases es la sustancia que forma la fase líquida, que o bien se evapora o bien se condensa (Treybal, 2001). En la figura N°13 se presentan fotos de los condensadores evaporativos de Planta Nueva utilizados para el desarrollo del presente proyecto.



Figura N°13: Vista lateral derecha y lateral izquierda de un condensador evaporativo.

III.4.1. Transferencia Simultánea de Calor y Masa.

La transferencia de masa puede suceder simultáneamente con la transferencia de calor, ya sea como resultado de una diferencia de temperatura impuesta desde fuera o debido a la absorción o evolución de calor, lo cual generalmente sucede cuando una sustancia se transfiere de una fase a otra. En tales casos, dentro de una fase, el calor transferido es el resultado, no solo de la conducción (convección) debida a la diferencia de temperaturas que ocurriría en

ausencia de transferencia de masa, sino que también incluye el calor sensible acarreado por la materia en difusión (Treybal, 2001).

En las mezclas de vapor / gas, el término vapor (A) se aplica a la sustancia que en el estado de vapor de agua esté relativamente cerca de su temperatura de condensación a la presión dominante. El término gas se aplica a la sustancia B, la cual es aire sobrecalentado.

III.4.1.1. Humedad Absoluta (Y'): representa la relación masa de vapor de agua / masa de aire. Esta relación es muy útil cuando en las operaciones ocurren cambios en el contenido de vapor de una mezcla vapor de agua – aire, sin cambios en el contenido del gas.

$$Y' = (P_{pA} / P_t - P_{pA}) * M_A \quad (5)$$

Donde

P_{pA} : Presión parcial de A (Pa)

Y': Humedad absoluta (adim)

P_t : Presión Total del Sistema (Pa)

M_A : Peso Molecular de A (kg/mol)

M_B : Peso Molecular de B (kg/mol)

III.4.1.2. Mezclas de Vapor de agua – aire, saturada

Si un aire seco insoluble B se pone en contacto con suficiente líquido A, el líquido se evaporará en el aire hasta que finalmente, en el equilibrio, la presión parcial de A en la mezcla alcanza su valor de saturación, la presión de vapor P_A a la temperatura dominante (Treybal, 2001).

$$P_{pA} = P_A \quad (6)$$

Donde

P_A : presión de vapor de agua a la temperatura de la mezcla saturada.

Por lo tanto, se tiene que la humedad absoluta másica a saturación es,

$$Y_{S'} = \frac{P_A}{P_t - P_A} * M_A \quad (7)$$

III.4.1.3. Mezclas de vapor de agua – aire, no saturada

En estos casos, se presenta que la presión parcial del vapor en una mezcla es menor que la presión de vapor en el equilibrio del líquido a la misma temperatura.

III.4.1.4. Humedad Relativa: permite cuantificar la saturación de la mezcla aire – vapor de agua. Se expresa como un porcentaje,

$$H.R. = \frac{P_A}{P_A(tg)} * 100 \quad (8)$$

Donde

H.R.: Humedad Relativa (%)

$P_A(tg)$: Presión de vapor de A a la temperatura del bulbo seco de la mezcla (Pa)

tg: Temperatura de bulbo seco de la mezcla (K).

III.4.1.5. Humedad Absoluta por ciento: la humedad absoluta por ciento, o saturación por ciento, se define como

$$\% \text{ Sat} = \frac{Y'}{Y_S'} * 100 \quad (9)$$

Donde

%Sat: Humedad absoluta por ciento (%)

III.4.1.6. Relación entre H.R. y %Sat:

$$\% \text{ Sat} = \text{H.R.} \frac{(P_t - P_A)}{(P_t - P_{pA})} \quad (10)$$

Siendo H.R. > %Sat

III.4.1.7. Punto de Rocío: Es la temperatura a la cual una mezcla aire – vapor de agua se satura cuando se enfría a presión total constante sin contacto con el líquido (Treybal, 2001).

III.4.1.8. Volumen Húmedo: El volumen húmedo (v_H) de una mezcla aire – vapor de agua es el volumen de masa unitaria de gas seco y de su vapor acompañante a la temperatura y presión dominantes. Se aplica gas ideal.

$$v_H = 8315 * ((1/M_B) + (Y'/M_A)) * ((t_G + 273)/P_t) \quad (11)$$

donde

v_H : volumen húmedo de la mezcla (m^3/kg)

En el caso del volumen húmedo de una mezcla saturada se calcula con $Y'=Y_S'$; y para un gas seco $Y'=0$.

III.4.1.9. Calor Húmedo: energía necesaria para aumentar la temperatura de la masa unitaria de gas seco y de su vapor acompañante.

$$C_S = C_B + Y * C_A \quad (12)$$

Donde

C_S : calor húmedo (J/kg K)

C_B : capacidad calorífica promedio del aire (J/kg K)

C_A : capacidad calorífica del vapor de agua (J/kg K)

III.4.1.10. Entalpía: la entalpía (relativa) de una mezcla aire – vapor de agua es la suma de las entalpías (relativas) del contenido en aire y en vapor (Treybal, 2001). La entalpía del gas solo es

$$H_B = C_B * (t_G - t_0) \quad (13)$$

Donde

t_0 : temperatura de referencia (°C). ($t_0 = 0^\circ\text{C}$)

$$H_A = C_A * (t_G - t_{DP}) + \lambda_{DP} + C_{A,L} * (t_{DP} - t_0) \quad (14)$$

Donde

H_A : entalpía por masa unitaria de vapor (KCal/h)

T_{DP} : temperatura del punto de formación de rocío (K)

λ_{DP} : calor latente de evaporación del vapor a la temperatura t_{DP} (K)

$C_{A,L}$: capacidad calorífica del vapor de agua en estado líquido (J/kg K)

Entonces, la entalpía total para la mezcla por masa unitaria del gas seco es

$$H' = C_B \cdot (t_G - t_0) + Y' \cdot [C_A \cdot (t_G - t_{DP}) + \lambda_{DP} + C_{A,L} \cdot (t_{DP} - t_0)] \quad (15)$$

Donde

H': entalpía total para la mezcla por masa unitaria del gas seco (KCal/h)

III.4.1.11. Sistema Aire - Agua.

El sistema aire-agua aparece con tanta frecuencia que se cuenta con cartas psicrométricas completas para esta mezcla. Las figuras N°14 y N°15 son versiones de dicha carta, en unidades SI e inglesas de ingeniería, respectivamente; para una presión total de 1 atm.

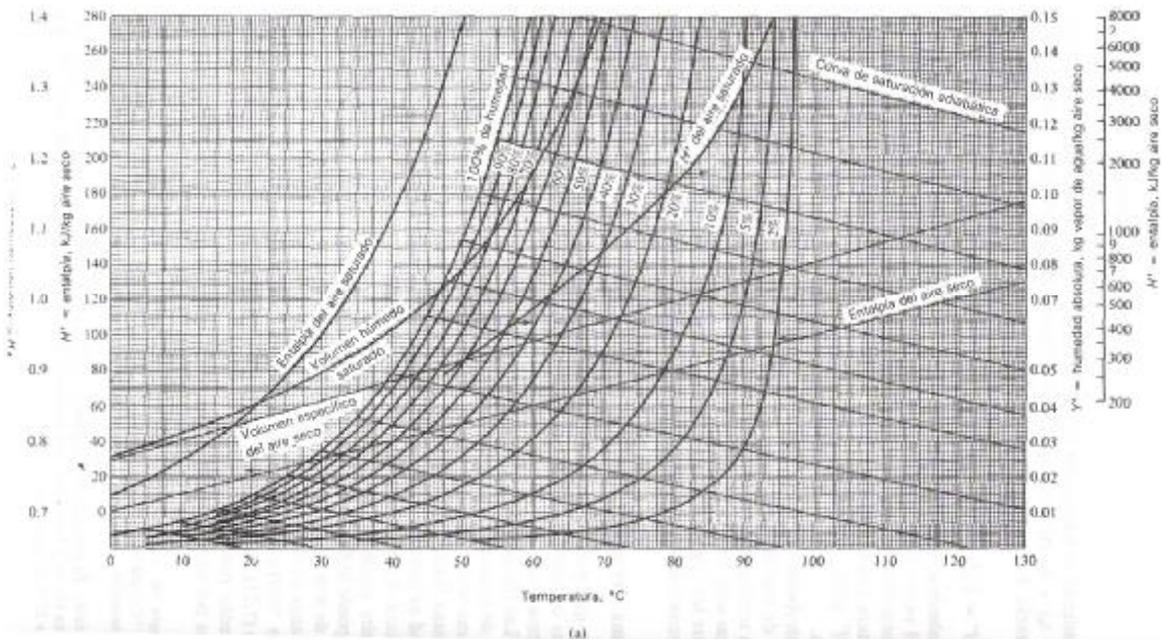


Figura N° 14: Carta psicrométrica para el aire-vapor de agua, 1atm std abs, en unidades SI.

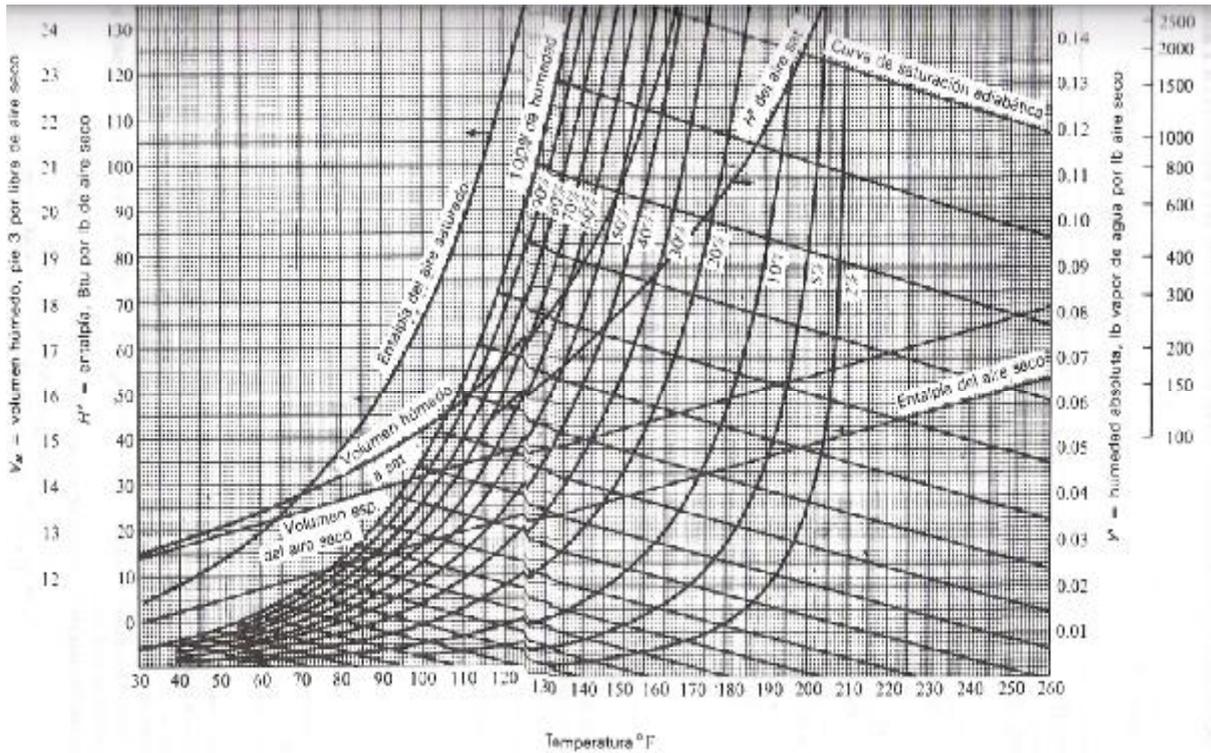


Figura N° 15: Carta psicrométrica para el aire-vapor de agua, 1atm std abs, en unidades inglesas de ingeniería.

III.4.1.12. Temperatura de Bulbo Húmedo.

Es la temperatura en estado estacionario alcanzada por una pequeña cantidad de líquido que se evapora en una gran cantidad de una mezcla vapor-aire no saturada. En condiciones apropiadamente controladas, dicha temperatura puede utilizarse para medir la humedad de la mezcla (Treybal, 2001).

Considérese una gota de líquido que se sumerge en una corriente de la mezcla vapor-aire no saturado que se mueve rápidamente. Si el líquido, inicialmente, está a una temperatura más elevada que la del punto de formación de rocío del aire, la presión de vapor del líquido será mayor en la

superficie de la gota que la presión parcial del vapor en el gas, y el líquido se evaporará y difundirá en el aire. El calor latente que se requiere para la evaporación será proporcionado inicialmente a expensas del calor sensible de la gota de líquido que entonces se enfriará. Tan pronto como la temperatura del líquido disminuye por debajo de la temperatura de bulbo seco del gas, fluirá calor del gas al líquido, a una rapidez que aumentará al irse incrementando la diferencia en temperatura. Finalmente, la rapidez de transferencia de calor del gas al líquido será igual a la rapidez de necesidad de calor para la evaporación, y la temperatura del líquido permanecerá constante en algún valor bajo, la temperatura de bulbo húmedo t_w . Ver figura N° 16 (Treybal,2001).

Mezcla Vapor - gas $\left\{ \begin{array}{l} t_G = \text{temperatura de bulbo seco} \\ \bar{P}_{AG} = \text{presión parcial de vapor} \\ Y' = \text{humedad absoluta} \end{array} \right.$

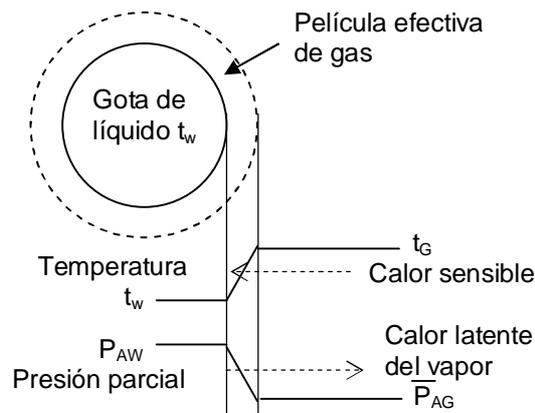


Figura N° 16: Temperatura del bulbo húmedo.

La transferencia de calor sensible hacia el bulbo del termómetro puede ser determinada de la siguiente manera,

$$q_S = (h_c + h_r) \cdot A_c \cdot (t_G - t_w - 273) \quad (16)$$

Donde

q_s : calor sensible hacia el bulbo (Kcal/kg)

h_c : coeficiente de transferencia de calor por convección ($W/m^2.K$)

h_r : coeficiente de transferencia de calor por radiación ($W/m^2.K$)

A_c : área de transferencia de calor en el bulbo (m^2)

t_w : temperatura de bulbo húmedo (K)

III.4.2. Operación no adiabática: Enfriamiento por Evaporación

En el enfriamiento por evaporación, se enfría un fluido cuando fluye a través de un tubo. El agua en forma de una película o una aspersión alrededor del exterior del tubo; se burbujea aire en el agua para acarrear el calor eliminado del fluido dentro del tubo.

Se aprovecha la elevada rapidez de transferencia de calor que resulta cuando el agua dispersada se evapora en la corriente de aire. En la figura N°10 se muestra el arreglo esquemático. Puesto que el agua se recircula de la parte superior a la inferior del intercambiador del calor, la temperatura a la cual entra t_{L2} , es la misma que a la cual sale, t_{L1} . Aun cuando la temperatura del agua no permanece constante al pasar a través del equipo, no varía demasiado respecto del valor final (Treybal, 2001).

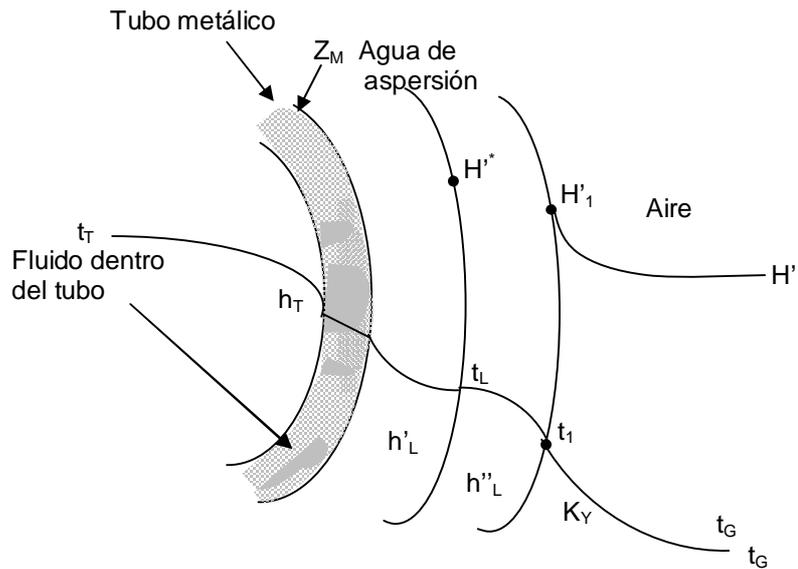


Figura N°17: Gradientes de temperatura y entalpía, enfriador por evaporación.

En la figura N°17 se muestran los perfiles de temperatura y de entalpía del gas a través de una sección típica del intercambiador.

CAPÍTULO IV

TRATAMIENTO QUÍMICO DEL AGUA

El agua es uno de los elementos que más aplicación tiene en la industria, pero su uso suele ocasionar trastornos en los procesos industriales debido a las sustancias que pueden encontrarse disueltas o en suspensión en ella.

Según el uso a que se destine el agua, son unas u otras de dichas sustancias las que pueden causar trastornos en el proceso industrial en que se las utilice, esto ha hecho necesario estudiar y determinar, no solamente cuales son esas sustancias perjudiciales sino también el modo de eliminarlas.

Las aguas destinadas para condensadores no deben contener más de una cierta proporción de aquellas sustancias susceptibles de formar depósitos o incrustaciones en el interior de los condensadores y sobre las superficies de los tubos del serpentín, durante el proceso de evaporación. La existencia de estas sustancias en el agua, produce lo que comúnmente se llama dureza; estas sustancias son: carbonatos de calcio y de magnesio, que se hallan combinados con anhídrido carbónico, y sulfatos, cloruros y nitratos, también de calcio y magnesio, que se encuentran simplemente en solución.

La dureza del agua se mide en gramos por galón (GPG), o miligramos por litro (mg/l, equivalente a partes por millón o ppm). El agua hasta 1 GPG (o 17.1 ppm) es considerada suave y un agua de 60 a 120 GPG es considerada moderadamente dura.

En la tabla N°1 se presentan los constituyentes en el agua que tienen mayor influencia con la formación de incrustaciones y corrosión.

Tabla N°1: Constituyentes del agua y sus efectos.

| Constituyentes | Efecto sobre el uso del agua |
|---------------------------------|---|
| Silica (SiO ₂) | En la presencia de calcio y magnesio, la sílice forma escamas en boilers y turbinas de vapor, que retardan el calentamiento, la escama es difícil de remover. La sílice puede ser añadida a agua suave para inhibir la corrosión de pipas de hierro. |
| Hierro (Fe) | Más de 0.1 ppm precipita después de exponer al aire; causa turbidos, mancha las instalaciones sanitarias, lavadero y utensilios de cocina e imparte un gusto desagradable y color a los alimentos y bebidas. Más de 0.2 ppm es descartable para la mayoría de los usos industriales. |
| Calcio (Ca) | Calcio y magnesio se combinan con bicarbonato, carbonato, sulfato y sílice para formar costras que retardan el calentamiento en boilers, intercambiadores de calor. Además, se combinan con iones de ácidos grasos en jabones, evitando que se forme espuma. |
| Magnesio (Mg) | Una alta concentración de magnesio tiene un efecto laxativo, especialmente en nuevos usuarios. |
| Carbonato (CO ₃) | Sobre el calentamiento el bicarbonato reacciona en fase vapor para dar, dióxido de carbono y carbonato. El carbonato se combina con tierras alcalinas- principalmente calcio y magnesio - para formar costras de carbonato de calcio que retardan el flujo de calor de la pipa. El agua conteniendo grandes cantidades de bicarbonato y alcalinidad es indeseable en muchas industrias. |
| Bicarbonato (HCO ₃) | Sobre el calentamiento el bicarbonato reacciona en fase vapor para dar, dióxido de carbono y carbonato. El carbonato se combina con tierras alcalinas- principalmente calcio y magnesio - para formar costras de carbonato de calcio que retardan el flujo de calor de la pipa. El agua conteniendo grandes cantidades de bicarbonato y alcalinidad es indeseable en muchas industrias. |
| Sólidos Disueltos | Más de 500 ppm es indeseable para bebidas y muchos usos industriales. Menos de 300 ppm es deseable para secado de |

| |
|--|
| textiles y manufactura de plásticos, papel, rayón. |
|--|

IV.1. Características Físicas del agua

Por medio de las características físicas que presenta el agua se pueden realizar estimaciones que permiten tomar decisiones respecto a su uso en algún caso determinado. Estas características son mayormente empleadas en ocasiones que no se cuentan con los instrumentos apropiados para determinar con mayor seguridad, los parámetros químicos del agua. Entre estas características se consideran la turbidez causada por la presencia de partículas en suspensión coloidal, que limitan el paso de la luz a su través, produciendo un efecto que hace ver el agua como si tuviese barro o estuviera sucia; el color del agua originado por la presencia de sustancias disueltas o en suspensión; el olor; sabor y la temperatura.

IV.2. Características Químicas de agua

En la industria, al nivel de los sistemas de enfriamiento, se tiende a utilizar con mayor frecuencia los parámetros que determinan las características químicas del agua, debido a que los productos y tratamientos, así como las condiciones de operación dependen directamente de los valores de pH, acidez, alcalinidad y dureza, partiendo de que se mantengan dentro de los rangos permisibles durante el funcionamiento de los equipos.

IV.3. Problemas ocasionados por la presencia de impurezas en el agua

IV.3.1. Corrosión.

Es el fenómeno mediante el cual los metales procesados retornan a su estado natural, es decir, como compuesto químico o mineral. Por ejemplo, en un sistema de enfriamiento, los metales procesados más comunes son: hierro, cobre y zinc. El hierro en su estado natural forma diferentes compuestos oxidados tales como el Fe_2O_3 , FeO , Fe_3O_4 y otros, pero cuando son procesados pierden el oxígeno y quedan como hierro puro (Fe°). Cuando este metal en un sistema está expuesto al contacto con el oxígeno presente en el agua, se convierte a su forma natural u oxidada; normalmente ocurren combinaciones de Fe_2O_3 y Fe_3O_4 (Lipesa, 1998).

En un sistema de enfriamiento, la corrosión debe ser controlada con la finalidad de evitar la falla del equipo, lo que causa costos de reparación y reemplazo, además de costos por paradas de planta y pérdidas de producción. La segunda razón por la que el proceso de corrosión debe tener control, es para que no disminuya la eficiencia del sistema por ensuciamiento con los productos de la corrosión, lo que genera pérdidas en la transferencia de calor.

Los factores que más intervienen en la corrosión son: el aumento de oxígeno y gases disueltos ya que reducen el pH, los sólidos disueltos porque alteran la velocidad de la corrosión debido a que aumentan la conductividad, la alcalinidad baja ocasionan la disolución del metal acelerando el proceso corrosivo, la temperatura alta aumenta las velocidades de las reacciones de corrosión, y una alta velocidad del agua aumenta la corrosión al transportar más oxígeno a la superficie metálica y arrastrar los productos de corrosión

más rápidamente. Así mismo, se puede originar erosión en las superficies metálicas, especialmente donde hay cambios bruscos en la dirección de flujo.

Los inhibidores de corrosión son sustancias que cuando son agregadas a un medio acuoso disminuyen la velocidad de ataque del medio sobre el metal. Los inhibidores son comúnmente agregados en pequeñas cantidades y en forma continua para mantener la concentración requerida y, de esta forma, lograr su efecto inhibitor. Existen inhibidores anódicos, catódicos y orgánicos.

IV.3.2. Incrustaciones.

Una incrustación es una capa, depósito o recubrimiento denso de material inorgánico, duro y fuertemente adherido a una superficie metálica. Está formado predominantemente por la precipitación de compuestos (sales) solubles en el agua y cuya solubilidad ha sido excedida debido a un aumento de la concentración de las sales presentes en la solución (Quijada J., 2004).

El agua tiene una serie de compuestos disueltos que son denominados sólidos disueltos, los cuales permanecen solubles en el agua bajo unas determinadas condiciones de pH, temperatura y concentración. Mientras estos sólidos permanecen disueltos no existe la posibilidad de que se formen las incrustaciones. El problema está en que, en un sistema de enfriamiento, las condiciones son tan dinámicas que la probabilidad para formarse las incrustaciones es bastante alta (Lipesa, 1998).

Las incrustaciones pueden ser de naturaleza cristalina o amorfa, conteniendo diferentes tipos de mineral y de cristales. Estos componentes originan una baja conductividad térmica, lo que impide la transferencia de energía a través de las superficies del intercambiador de calor. En la tabla N°2 se muestran las incrustaciones más comunes que presentan las aguas de enfriamiento.

Tabla N°2: Características de las incrustaciones más comunes en el agua.

| COMPUESTO | CARACTERÍSTICAS |
|---|---|
| Carbonato de Calcio (CaCO ₃) | <ul style="list-style-type: none"> ➤ Es la incrustación mineral más común en los sistemas de enfriamiento. ➤ Son depósitos muy fuertes. ➤ Su solubilidad disminuye al aumentar la temperatura, por lo que los depósitos aparecen en las áreas de transferencia de calor. ➤ $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2 \xrightarrow{\text{Calor}} \text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 \uparrow + \text{H}_2\text{O} \downarrow$ ➤ La presencia de CO₂ aumenta la solubilidad del carbonato de calcio en el agua y el pH disminuye. ➤ El aumento de pH incrementa la formación de incrustaciones, de igual manera ocurre con la alcalinidad. ➤ La solubilidad del CaCO₃ aumenta cuando el contenido de sólidos disueltos se incrementa. |
| Sulfato de Calcio (CaSO ₄) | <ul style="list-style-type: none"> ➤ Es relativamente soluble y no presenta problemas en la mayoría de las aplicaciones de agua de enfriamiento. ➤ Se presenta de dos formas: sulfato de calcio anhídrido (CaSO₄) y yeso (CaCO₄.2H₂O). ➤ La solubilidad del yeso es directamente proporcional a la temperatura mientras que la del anhídrido es inversamente proporcional a la misma. ➤ $\text{Ca}^{+2} + \text{SO}_4^{-2} \longrightarrow \text{CaSO}_4$ ➤ El pH tiene poca influencia sobre la solubilidad del calcio. ➤ El CaSO₄ tiene una solubilidad cien veces mayor que la del CaCO₃ a las temperaturas de operación de un sistema de enfriamiento. |
| Silicato de Magnesio (MgSiO ₃) | <ul style="list-style-type: none"> ➤ Es una incrustación sumamente resistente y vítrea, resultando muy difícil de remover, excepto por métodos de limpieza mecánicos o por métodos químicos especiales. ➤ Se ha empleado con éxito el ácido fluorhídrico o el bicloruro de |

| | |
|---|---|
| | <p>amonio; sin embargo, el manejo de estos productos es muy peligroso.</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Su precipitación está muy influenciada por el pH y las concentraciones de Mg y SiO₂. ➤ Su precipitación está influenciada por el flujo calórico, la temperatura de la masa del agua y la razón Ca/Mg. ➤ Cuando esta relación es 1:1 o la concentración de magnesio exceda la de calcio, el potencial de formación de MgSiO₃ aumenta considerablemente. ➤ La precipitación del MgSiO₃ acompaña normalmente a la precipitación de CaCO₃. ➤ Su solubilidad es inversamente proporcional a la temperatura. |
| Sílice (Si) | <ul style="list-style-type: none"> ➤ Estas incrustaciones puras son raras pero una vez que se han formado son muy difíciles de remover. ➤ Generalmente ocurren cuando la concentración de SiO₂ en el de recirculación es mayor que 150 ppm. ➤ Su solubilidad aumenta al aumentar el pH y la temperatura. ➤ La solubilidad de la sílice aumenta al incrementar el pH, sólo cuando la concentración de Mg es muy baja y la razón de Ca/Mg es mayor que 2. ➤ En aguas con un alto contenido de sílice, la precipitación ocurrirá en las secciones más frías del sistema. |
| Óxido de Hierro (Fe ₂ O ₃) | <ul style="list-style-type: none"> ➤ Es insoluble, precipita y forma incrustaciones. Esto ocurre en sistemas de enfriamiento abiertos debido a la presencia de oxígeno. |

Los compuestos mencionados en la tabla anterior forman incrustaciones, entre otras cosas, debido a la baja solubilidad que presentan estas sales, y algunas de ellas como el caso del sulfato de calcio, decrece con el aumento de la temperatura. Estas incrustaciones forman depósitos duros muy adherentes, difíciles de remover. Algunas de las causas de este fenómeno son las siguientes:

- ✚ Excesiva concentración de sales en el interior de la unidad.
- ✚ El condensado tiene algún tipo de contaminación.
- ✚ Transporte de productos de corrosión a zonas favorables para su precipitación.
- ✚ Aplicación inapropiada de productos químicos.

Las incrustaciones constituyen uno de los problemas más comúnmente encontrados en los sistemas de enfriamiento. Cuando se forman incrustaciones en las superficies de los intercambiadores de calor y en las tuberías de transferencia, disminuye el intercambio de calor, causan problemas muy serios de obstrucción del flujo, aceleran el ensuciamiento, fomentan cierto tipo de corrosión, y aumentan la contrapresión de bombeo. Esto a su vez, resulta en una disminución del rendimiento y limitación de la capacidad de producción de la planta, de la eficiencia de los equipos que conforman el sistema; además, ocurren más tiempos de paradas de mantenimiento a la planta e inclusive pueden ser causantes de paradas no programadas.

Por otra parte, se debe considerar las fallas de los tubos ocasionadas por sobrecalentamiento, debido a la presencia de depósitos que aíslan el metal del agua que los rodea, pudiendo así sobrevenir desgarros o roturas en los tubos de la unidad con los perjuicios que ello ocasiona.

IV.3.2.1. Elementos que favorecen la formación de incrustaciones.

Para que se lleve a cabo la formación de las incrustaciones es necesario que se den cuatro condiciones simultáneas;

IV.3.2.1.1. Sobresaturación: es el punto en que la concentración de una sal excede su solubilidad en el agua. Un sistema de enfriamiento llega a la sobresaturación debido a evaporación, fluctuaciones de pH o cambios de temperatura. El potencial de incrustación aumenta en función de la sobresaturación (Quijada J., 2004).

IV.3.2.1.2. Nucleación: es la formación de muchas partículas pequeñas que no precipitan sino que actúan como zonas que favorecen el crecimiento de cristales. La nucleación tiene lugar por medio de dos mecanismos básicos: homogénea y heterogénea. La nucleación homogénea ocurre de forma espontánea y es causada por un alto nivel de sobresaturación de la especie incrustante. La heterogénea, ocurre cuando partículas extrañas o la rugosidad superficial inician la formación de las incrustaciones. Esta última es la más común, en los sistemas de enfriamiento debido a la presencia de sólidos en suspensión, productos de corrosión, soldaduras, hendiduras, la rugosidad superficial de la pared de un intercambiador de calor y películas de óxido (Quijada J., 2004).

IV.3.2.1.3. Tiempo de Contacto: una vez que la solución está sobresaturada y haya ocurrido la nucleación, debe transcurrir suficiente tiempo de contacto entre la solución y los sitios nucleantes, con la finalidad de que se puedan formar las incrustaciones. El tiempo necesario para la formación de las incrustaciones va a presentar variaciones dependiendo del nivel de sobresaturación, tipo y número de zonas de nucleación, temperatura, pH, agitación. Por lo general, mientras mayor sea el tiempo de contacto mayor probabilidad tiene que se formen las incrustaciones.

IV.3.2.1.4. Formación de Incrustaciones por precipitación: durante la acumulación de depósitos incrustantes se producen nuevas formaciones de depósitos en las caras del cristal. Las incrustaciones recientemente precipitadas pueden ser eliminadas con facilidad, mientras que las que presentan mucho tiempo depositadas se endurecen y se adhieren con mayor fuerza a la superficie, haciéndose difícil su eliminación.

IV.3.2.2. Factores que incrementan la formación de incrustaciones.

IV.3.2.2.1. pH: la mayoría de las sales presentes en el agua disminuyen su solubilidad cuando el pH aumenta, por lo que, incrementa su potencial incrustante. Los descensos de pH aceleran la corrosión, proporcionan zonas de nucleación para la formación de incrustaciones y aumentan el potencial para algunas formas de incrustaciones de sílice (Lipesa, 1998).

IV.3.2.2.2. Temperatura: la solubilidad de muchos minerales disminuye al aumentar la temperatura, como es el caso del carbonato y el fosfato de calcio. Las altas temperaturas de la superficie pueden provocar la formación de incrustaciones, reduciendo en consecuencia la transferencia de calor.

IV.3.2.2.3. Sólidos Totales Disueltos (TDS) y Sólidos en Suspensión: cuando se tienen altas cantidades de TDS se puede aumentar la solubilidad de algunas sales incrustantes, reaccionando con los iones libres (sodio y potasio) presentes en el agua. La presencia de gran cantidad de sólidos en suspensión aumenta la capacidad de formación de incrustaciones debido, principalmente, al crecimiento de las zonas de nucleación.

IV.3.2.2.4. Factores Hidrodinámicos: el tipo de trayectoria (laminar o turbulento) que presente el fluido sobre la superficie del metal puede tener efecto significativo en la formación de incrustaciones, ya que a bajas velocidades (régimen laminar) se da tiempo para que se produzca la nucleación, el crecimiento de cristales y la formación de incrustaciones densas y adherentes.

IV.3.2.2.5. Corrosión: la rugosidad superficial y el número de partículas de óxidos metálicos que actúan como zonas de nucleación para el crecimiento de los cristales, aumentan la corrosión y por

ende el potencial de formación de incrustaciones. La mezcla de productos de corrosión e incrustaciones puede producir un depósito adherente.

IV.3.2.2.6. Ensuciamiento: el ensuciamiento afecta la formación de incrustaciones causando un aumento en la temperatura de la superficie, en la corrosión y en el número de zonas disponibles para la nucleación de las incrustaciones (Quijada J., 2004).

IV.3.2.3. Inhibidores de Incrustaciones.

Los inhibidores de incrustaciones son productos químicos que se encargan de dispersar los cristales o mantenerlos en solución, a fin de evitar la formación de incrustaciones. Estos productos actúan independientemente de su composición, formulación y mecanismo de acción. Cuando se emplean estos productos es necesario tener un estricto monitoreo del control de las variables o parámetros involucrados con la aplicación de los mismos.

Los inhibidores de incrustaciones pueden operar de distintos mecanismos de acción: inhibición umbral o modificación de cristales, secuestrantes o quelación y dispersión.

IV.3.2.3.1. Mecanismos

IV.3.2.3.1.1. Inhibición Umbral: es la capacidad que tienen los inhibidores de incrustaciones de mantener grandes cantidades de sales incrustantes en solución

IV.3.2.3.1.2. Secuestrantes: son compuestos orgánicos que reaccionan con los iones formadores de incrustaciones para formar

complejos estables y solubles en agua, evitando, por tanto, la precipitación de incrustaciones que contengan estos iones (Quijada J., 2004).

IV.3.2.3.1.3. Dispersantes: actúan absorbiéndose sobre la superficie de la partícula coloidal reforzando de esta forma su carga negativa, produciendo un efecto de repulsión con otras partículas. De esta forma se evita su aglomeración para formar partículas más grandes que precipitan y forman incrustaciones.

IV.3.3. Ensuciamiento

El ensuciamiento son depósitos originados por material suspendido en el agua que se diferencia de las incrustaciones porque estos últimos se forman a partir de material disuelto o que está en solución. Estos depósitos pueden ser formados a partir de:

- ✚ Sólidos suspendidos presentes en el agua de reposición, tal es el caso de lodo, hierro y materia orgánica.
- ✚ Precipitación de aditivos químicos debido a un pésimo control.
- ✚ Sólidos suspendidos producto de la corrosión y de sales incrustantes.
- ✚ Contaminación orgánica por fugas del proceso.
- ✚ Crecimiento microbiológico.
- ✚ Partículas provenientes del aire que son introducidas al sistema de enfriamiento durante el contacto aire-agua.

El hecho de que los sólidos suspendidos precipiten, acelera el proceso de ensuciamiento en un sistema, siendo esto ocasionado por la influencia de dos o más factores, de los que se mencionan a continuación.

IV.3.3.1. Efectos del ensuciamiento sobre la efectividad del sistema de enfriamiento.

El ensuciamiento tiene efectos negativos sobre la eficiencia de un sistema de enfriamiento, ya que influyen sobre los aspectos siguientes:

- ✚ Incremento de la actividad microbológica.
- ✚ Permite la corrosión e inhibe la formación de la película inhibidora.
- ✚ Absorbe los productos químicos del tratamiento: inhibidores de corrosión e incrustaciones.
- ✚ Reduce la transferencia de calor.

Debido a todo esto, es importante mantener controlado el ensuciamiento en un sistema. Para poder lograr dicho fin se plantean métodos de control, los cuales serán explicados en la siguiente sección.

IV.3.3.2. Métodos para controlar el ensuciamiento.

Existen dos métodos para controlar el ensuciamiento, éstos son: los ajustes mecánicos y los productos químicos.

IV.3.3.2.1. Ajustes Mecánicos: existen una serie de ajustes mecánicos que se pueden realizar para prevenir y controlar el ensuciamiento en un sistema de enfriamiento:

- ✚ Clarificación y filtración del agua.
- ✚ Filtración Colateral.
- ✚ Desviadores.
- ✚ Inyección de aire.

- ✚ Inversión de flujo.
- ✚ Limpieza de la piscina de la torre.
- ✚ Ubicación de los intercambiadores.

IV.3.3.2.2. Productos Químicos: existen dos familias de productos químicos que ayudan a controlar el problema de ensuciamiento, estos son:

- ✚ Dispersantes o reforzadores de carga.
- ✚ Reductores de tensión superficial.

IV.3.4. Formaciones Microbiológicas

Los sistemas de enfriamiento y, en particular, los sistemas recirculantes abiertos son medios muy favorables para el crecimiento microbiológico, lo que contribuye a la formación de depósitos, ensuciamiento y corrosión dentro del sistema. La presencia de microorganismos radica en que una variedad de microorganismos son introducidos continuamente al sistema a través del aire usado para el enfriamiento o a través de la reposición. Estos microorganismos son bacterias, algas y hongos.

Existen una serie de factores que influyen en el desarrollo y multiplicación de los microorganismos. Estos factores son: pH, temperatura y requerimientos nutricionales.

Los sistemas de enfriamiento recirculantes son ideales para promover el crecimiento y distribución de los microorganismos. Condiciones favorables como agua saturada con oxígeno, luz solar, temperatura entre 30 y 60°C y pH de 6 a 9 existen en estos sistemas.

La falta de control microbiológico, las condiciones favorables de estos sistemas y la rápida velocidad de reproducción de los microorganismos, permiten predecir que un sistema bajo estas condiciones presenta problemas graves de transferencia de calor y deterioro del mismo en un lapso de tiempo relativamente corto. El control microbiológico en un sistema de enfriamiento se realiza mediante el uso de microbiocidas. Si se quiere inhibir el crecimiento se aplican bacteriostáticos, y si se desea matar microorganismos se usan biocidas. En ambos casos se limita el número de bacterias a valores inocuos.

IV.4. Análisis físico-químicos realizados al agua

Los análisis de agua son herramientas básicas, que debe ser dominada a plenitud. Estos permiten evaluar, a partir de muestras de agua de la purga, la efectividad de un tratamiento, así como prevenir posibles fallas en los equipos por incrustaciones, ensuciamiento o corrosión. Los principales análisis de agua se dividen en instrumentales, de titulación y colorímetros, los cuales se describen a continuación.

IV.4.1. Instrumentales

IV.4.1.1. pH: es una medida de la acidez o basicidad del agua. Es un análisis muy importante debido a que la acción de los inhibidores de corrosión e incrustaciones, así como la formación de éstos (corrosión e incrustaciones) va a depender de ciertos rangos de pH. Es por esto, que el agua de los sistemas de enfriamiento debe presentar un valor de pH que se encuentre dentro de los límites necesarios, para que los inhibidores actúen y la velocidad de corrosión disminuya. La

medición del pH se realiza a partir de un instrumento que es el pH-metro.

IV.4.1.2. Conductividad (TDS): por medio de la conductividad se puede medir la cantidad de sólidos disueltos que se encuentran en la solución, sabiendo que el valor arrojado se expresa en $\mu\text{mhos/cm}$ o $\mu\text{S/cm}$. La conductividad puede ser utilizada para controlar los ciclos de concentración (CC). En un sistema de enfriamiento recirculante abierto, los ciclos de concentración son los que relaciona el nivel de sólidos disueltos en el agua de recirculación y en el agua de reposición. Dichos ciclos de concentración se determinan mediante un balance del ión más soluble (Sílice, Cloruros, Magnesio, Calcio, etc.), en el agua recirculante y el agua de reposición. La ecuación de cálculo es la siguiente:

$$\text{CC} = \frac{\text{Concentración del ión en el agua de recirculación}}{\text{Concentración del ión en el agua de reposición}} \quad (17)$$

IV.4.2. De Titulación

IV.4.2.1. Dureza: la medida de la dureza permite determinar la concentración de sales de calcio y de magnesio que tiene el agua de enfriamiento. Esto participa en el buen funcionamiento del tratamiento que se esté aplicando, siempre y cuando se mantenga dentro de los límites y rangos. Se expresa en ppm como CaCO_3 .

IV.4.2.2. Alcalinidad: es un análisis que permite calcular la concentración de carbonatos, bicarbonatos y OH. Se utiliza también para determinar las precipitaciones de la dureza asociada a ella a través de un balance, para mantener los valores dentro de los rangos determinados por el tratamiento. Se expresa en ppm como CaCO_3 .

IV.4.3. Colorimétrico

IV.4.3.1. Hierro: es un análisis para determinar la concentración de hierro soluble o total. Se utiliza para conocer el rendimiento de los inhibidores de corrosión, posibles contaminantes en la reposición. Se expresa como ppm de hierro.

IV.4.3.2. Sílice: análisis para determinar la concentración de sílice reactiva. Se utiliza sobre todo para conocer los ciclos de concentración. Se expresa en ppm como sílice.

Las metodologías necesarias para determinar cada uno de los parámetros antes mencionados (pH, TDS, Dureza, etc.) pueden ser consultado en el Standard Methods for the Examination of water and wastewater.

IV.5. Productos Químicos Desincrustantes

Cuando se va a llevar a cabo la limpieza de incrustaciones de un condensador se deben analizar distintos productos químicos de diferentes empresas, con la finalidad de utilizar en el tratamiento químico desincrustante el o los productos más eficientes al menor costo posible.

El nombre real de las empresas y de los productos no será mencionado con el fin de evitar cualquier tipo de opinión que pueda afectar la imagen de las mismas. Es por esto, que se emplearán letras para identificar las empresas (D, E y L) y a los productos (AS, AF, D y L), los cuales serán descritos a continuación.

IV.5.1. Producto AS.

Es un producto especialmente formulado basado en ácido que remueve las incrustaciones calcáreas debido al uso de agua dura en el sistema de intercambio de calor. Puede ser usado en las limpiezas ácidas de calderas de vapor, sistemas de enfriamiento abiertos, chiller y condensadores evaporativos.

IV.5.2. Producto AF.

Es un producto ácido especialmente formulado. Es muy concentrado y extrafuerte, que contiene una mezcla de cuatro ácidos minerales fuertes, humectantes, solventes y emulsificantes. Remueve incrustaciones severas, restos de óxido, hollín, depósitos de grasa quemada, etc.

Está diseñado para la limpieza de serpentines de evaporación y condensación, instaladas en aire acondicionado y sistemas de intercambio de calor. Se emplea en desincrustaciones severas y limpiezas ácidas de calderas de vapor, sistemas de enfriamiento abiertos y chillers.

IV.5.3. Producto D.

Es un producto apropiado para la desincrustación de metales ferrosos. Las temperaturas de trabajo no deben exceder los 50°C. Adicionalmente a este producto, se debe emplear una solución alcalina de pH 12 para neutralizar. Este producto es un líquido ácido con inhibidor de corrosión. El pH de una solución al 1% es de 1.3.

IV.5.4. Producto L.

Se utiliza para disolver incrustaciones de sales de calcio, magnesio, óxido de hierro y depósitos solubles en ácidos fuertes. Se aplica en la limpieza de equipos como calderas, intercambiadores de calor, tuberías, sistemas de enfriamiento, de compresores, equipos de procesos, sistemas de decapado para cromado y galvanizado. Este producto contiene una solución de ácido clorhídrico.

IV.6. Productos Químicos para el Tratamiento Preventivo

Una vez realizada la limpieza del condensado, es necesario instalar un sistema de alimentación en el que el agua de reposición y de recirculación mantenga las condiciones más adecuadas, con la finalidad de que se minimicen considerablemente la formación de incrustaciones y de corrosión, y se alargue la vida útil del equipo.

Este sistema de alimentación debe comprender la reposición de agua suave al condensador. Aunado a esto, se deben emplear productos químicos para la inhibición de incrustaciones y de corrosión.

Para la inhibición de incrustaciones se está considerando los productos AT y C, los cuales corresponden a diferentes empresas. En cuanto a la inhibición de corrosión, sólo se considera un producto, el IC, el cual está siendo aplicado actualmente.

IV.6.1. Producto AT.

Es un dispersante líquido. Es efectivo a través de un amplio rango de pH y temperatura para la completa dispersión de lodos, arena, hierro, materia orgánica, etc., en sistema de enfriamiento abierto de pequeña y gran capacidad. Este sistema de dispersión permite mantener suspendidos cualquier clase de material sólido, facilitando su remoción a través de la purga. Se emplea en sistemas de enfriamiento, como tratamiento preventivo y correctivo de las incrustaciones debidas a la formación de lodos.

IV.6.2. Producto C.

Es un aditivo concentrado para acondicionar las aguas. Este producto hace precipitar la dureza atrapando los iones de calcio y magnesio que se encuentran en el agua, formando un compuesto no adherible evitando así la formación de depósitos. Este compuesto no adherible puede ser entonces removido de la caldera o condensador por medio de la purga.

IV. 6.3. Producto IC

Es un compuesto alcalino que evita las incrustaciones en los equipos y tuberías, a la vez que controla la corrosión y dispersa los lodos y materiales orgánicos contenidos en el sistema, manteniendo una eficiente transferencia de calor. Suaviza el agua de alimentación y asegura un adecuado nivel de pH. Presenta una acción dispersante que ayuda a la remoción y suspensión de materia orgánica y lodos. Se emplea en sistemas de enfriamiento.

CAPÍTULO V

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN Y PLAN DE EXPERIENCIAS

La metodología de la investigación contempla los métodos que se van a aplicar para alcanzar los objetivos propuestos en el Trabajo Especial de Grado. Entre los aspectos que aquí se tratan se tienen la metodología aplicada, la descripción de los equipos, las condiciones iniciales del sistema en estudio y las pruebas de los productos químicos desincrustantes, así como las consideraciones tomadas para los diferentes estudios y análisis a realizar.

V.1. Metodología

La serie de pasos o actividades que se realizaron para poder alcanzar los objetivos planteados en el proyecto son los que se presentan a continuación:

1. Búsqueda y revisión bibliográfica relacionada con termodinámica, transferencia de calor, sistemas de refrigeración, condensadores evaporativos, tratamiento de aguas para sistemas de enfriamiento y sobre los productos químicos empleados en los tratamientos.
2. Inducción del funcionamiento y operación del Sistema de Refrigeración, considerando cada uno de los equipos involucrados y las aplicaciones que se le da al mismo.
3. Inspección interna de los condensadores para conocer los equipos y, para observar las incrustaciones y el nivel de cubrimiento que presentan los tubos.

4. Planteamiento de la metodología práctica en estado estacionario, que permita determinar la cantidad de agua evaporada por los condensadores, así como la cantidad de calor eliminado por evaporación. El conocimiento del caudal de agua evaporada permitió evaluar las incrustaciones que presentaba el equipo, tomando como valor comparativo, el caudal de agua evaporada y calor total eliminado en el condensador cuando éste es nuevo. Este valor fue suministrado por el fabricante del equipo.
5. Establecer, y en caso de ser necesario instalar, los implementos e instrumentos necesarios para poder realizar las mediciones de agua evaporada. Esto se derivó a partir de las ecuaciones establecidas en el modelo matemático planteado en este trabajo.
6. Una vez implementado el modelo y los instrumentos, se procedió a la medición de temperaturas, tiempo y alturas en la piscina del condensador, necesarios para determinar el caudal de agua evaporada en el equipo. Se realizaron 15 mediciones, aproximadamente, en esta primera etapa.

Antes de comenzar cualquier estudio de mejoras, se midieron las condiciones iniciales de operación del equipo, empleando una alimentación de agua dura. Por otra parte, se evaluó la variación del caudal de agua evaporada por el condensador durante diferentes horas del día, realizando mediciones por la mañana y por la tarde, aproximadamente a la misma hora cada una. Además, partiendo de consideraciones teóricas del tutor industrial del trabajo, se incluyó una corrección por altura (disminución de la densidad del aire) en el cálculo del calor transferido por el condensador evaporativo.

Es importante destacar que los fabricantes del equipo no tienen en cuenta estas variaciones en los cálculos preliminares de selección de la capacidad del equipo.

7. Antes de aplicar el tratamiento desincrustante se realizaron pruebas en el laboratorio respecto a la efectividad de los distintos productos desincrustantes, pertenecientes a diferentes proveedores. Adicionalmente, se hicieron análisis de costos de las posibles inversiones que requiera cada uno de los tratamientos, a partir de las cotizaciones. Para las pruebas se prepararon las soluciones con agua dura y los productos químicos a las concentraciones recomendadas por los proveedores. A cada una de estas soluciones se le añadió una cantidad determinada de incrustaciones, las cuales son obtenidas del condensador. Se observó la reacción de las cuatro soluciones, así como de las incrustaciones. Se estudiaron cuatro productos desincrustantes: dos de la empresa W (AS y AF), uno de la empresa E (D) y L de la empresa L. Se hicieron 3 pruebas con cada una de las condiciones antes mencionadas.
8. Después de seleccionar el producto químico que iba a ser utilizado en el tratamiento desincrustante, se efectuó dicho tratamiento con la asesoría técnica de los proveedores.
9. Se realizaron mediciones para determinar el caudal de agua evaporada, a fin de comprobar la efectividad del tratamiento y las posibles mejoras en el equipo, con relación a las incrustaciones. Se realizaron 10 mediciones, aproximadamente, en esta segunda etapa.
10. Junto con la determinación de agua evaporada se llevaron a cabo una serie de análisis de agua, lo que incluye el pH, alcalinidad total, dureza total y sólidos disueltos, con la finalidad de corroborar la liberación de sólidos, así como de asegurar condiciones en el agua

que minimicen la formación de incrustaciones y de corrosión. Se analizaron 15 muestras, aproximadamente.

Para la medición de pH y de sólidos disueltos se dispuso de equipos de medición directa. Un pH-metro, equipo que da el valor de pH directamente; y un conductímetro que proporciona el valor de conductividad, al cual se le multiplica un factor y se puede obtener la cantidad de sólidos totales disueltos que se encuentran en la muestra de agua.

En el caso de la alcalinidad total y dureza total, el análisis es realizado mediante titulación. En la alcalinidad total, se titula con ácido sulfúrico y se emplea como indicador el anaranjado de metilo. Para la dureza, la titulación se realizó con EDTA y se utilizó como indicador el Negro Eriocromo T.

Adicionalmente se realizaron:

10.1. Mediciones que permitieron categorizar analíticamente la posible capacidad desincrustante del agua suave obtenida por los suavizadores instalados en la planta, 5 mediciones aproximadamente.

10.2. Estimación de los agentes inhibidores de corrosión industriales en cuanto a su capacidad de acción y costos para una selección adecuada de los mismos.

11. Dependiendo de los resultados arrojados en los puntos 9 y 10 se analizaron la posibilidad de realizar el tratamiento mecánico, tomando en cuenta el tiempo y la complejidad de dicho tratamiento.

Es imprescindible considerar la logística que implicaría la realización del tratamiento mecánico, ya que es un proceso que requiere de tiempo y coordinación. Para ejecutar el tratamiento mecánico se necesitarían 4 días aproximadamente, lo que implica, que en esos cuatros días va a trabajar un solo condensador, un compresor y un

chiller, por lo que se realizaron en días donde la carga térmica no era tan alta y que pueda ser manejada por un solo compresor.

Por otra parte, en el tratamiento mecánico trabajan dos operarios golpeando los tubos con un cincel y un martillo cada uno, pudiendo ocasionar ruptura y/o desprendimiento de algún tubo.

Todo esto forma parte de los aspectos a tomar en cuenta en el momento de decidir la realización del tratamiento mecánico.

Se llevaron a cabo una serie de 10 mediciones, aproximadamente.

12. Evaluación de la capacidad de los suavizadores empleados para la alimentación de las calderas de Planta Nueva, con el propósito de disponer con parte de esa agua para la alimentación de los condensadores.

Para esta evaluación, se implementó un monitoreo de la altura de la piscina del condensador desde el momento en que se esté alimentando agua suave a los equipos. Se comenzó con 20 minutos de observación continua, después dos horas con observación cada hora, y dependiendo de la tendencia que presente en esos dos días, se irá dejando por 8 horas, luego 1 día, 2 días. Aunado a esto, se estimó numéricamente, suponiendo que los suavizadores, las calderas y los condensadores estén trabajando a capacidad máxima, lo que corresponde a la capacidad dada por el fabricante de cada uno de los equipos.

En la práctica, la probabilidad real depende de que exista suministro suficiente de agua al suavizador, que el suavizador opere sin una caída de presión grande y que el consumo de las calderas no sea grande.

13. En caso de que la capacidad de los suavizadores, estudiada en el punto anterior no sea suficiente, se evaluarían diferentes posibilidades en el mercado para la adquisición de un suavizador.

14. Se investigó el uso de agua suave únicamente, o alguna mezcla de agua suave con agua dura a una determinada proporción. Se recurrió a las referencias bibliográficas relacionadas con el tratamiento de aguas, y a las asesorías técnicas que puedan suministrar los proveedores de los productos químicos para aguas.
15. Al evaluar el suministro de agua a los condensadores como una mezcla de agua suave con agua dura, fue necesario analizar el sistema de flujo determinando las tuberías, válvulas y bombas actuales, y las que eran necesarias colocar.
16. Realización de 3 pruebas de laboratorio para el tratamiento preventivo a utilizar una vez alcanzado el mayor grado de limpieza posible en los condensadores.

Para estas pruebas, se prepararon soluciones de agua suave con el producto químico y se le añadieron trozos de incrustaciones, previamente pesados. Se dejaron por varios días y luego se observó la solución. Posteriormente, se pesaron las incrustaciones presentes para conocer el efecto del producto sobre la misma. Se experimentó con dos productos de distintas empresas: el producto AT de la empresa W, y el producto C de la empresa E. Una prueba análoga se realizó con las siguientes variantes:

- 16.1. Incrustaciones – agua suave
- 16.2. Incrustaciones – agua suave e inhibidor
- 16.3. Incrustaciones – agua suave – inhibidor – agente dispersante

A partir de estas pruebas y de la efectividad de estos productos, se decidió el tipo de tratamiento a utilizar en los condensadores para prevenir posibles incrustaciones y la corrosión.

17. Instalación de un sistema dosificador automático de producto químico para ambos condensadores. Se tomó en cuenta las posibles bombas y/o tuberías a instalar, a través de un estudio del sistema de flujo.

18. Implementación de análisis de agua de los condensadores evaporativos en cuanto a pH, alcalinidad total, dureza total y sólidos disueltos, con el propósito de controlar el efecto del tratamiento preventivo, minimizar la formación de incrustaciones, corrosión y ensuciamiento dentro del condensador, y determinar las purgas continuas o periódicas que se deben realizar en los equipos.
19. Establecer rutinas de análisis de agua de los condensadores evaporativos existentes en la empresa con el objetivo de que el encargado del departamento de aguas industriales tenga control de los parámetros medidos en el agua y los mantenga dentro de los límites establecidos.
20. Estimación de los costos de los productos químicos mediante las cotizaciones obtenidas de los fabricantes de dichos productos con el objeto de ejecutar los diversos tratamientos y cambios que requiera el sistema.

V.2. Descripción de Instrumentos y Equipos empleados

En esta sección se describirán los instrumentos y equipos utilizados en las evaluaciones químicas establecidas para los análisis de agua, las cuales se efectuaron en el laboratorio de INACOR.

V.2.1. pH-metro.

Equipo usado para medir el pH en el agua de recirculación del sistema de enfriamiento o condensador. El aparato posee una escala de 0 a 14 unidades de pH, y dicho dispositivo cuantifica el pH del agua a través de un electrodo, el cual envía una señal eléctrica al pH-metro mostrando el valor leído en la pantalla del equipo.

V.2.2. Conductímetro.

Equipo empleado para la medición de conductividad en el agua de recirculación. Únicamente, sumergiendo el electrodo en la muestra de agua se obtiene el valor de la conductividad que presenta dicha muestra.

V.2.3. Instrumentos para Titulación.

Para realizar las titulaciones se emplearon instrumentos de vidrio como las fioles y las buretas, siendo estas últimas las usadas para medir el volumen del titulante utilizado.

En cuanto a los equipos usados para la medición de agua evaporada se empleó un cronómetro, una cinta métrica y un higrómetro. De estos, es importante explicar cómo se usa un higrómetro.

V.2.4. Higrómetro.

El higrómetro se aplica en la medición de temperaturas de bulbo húmedo y de bulbo seco, así como en la estimación de la humedad. Para esto, cuenta con dos termómetros, uno de los cuales tiene en el bulbo una tela que a su vez es introducida en un pequeño tanque con agua, lo que permite mantener húmedo el bulbo de este termómetro. Además, tiene una tabla con la que se puede estimar la humedad del lugar partiendo de la diferencia entre la temperatura de bulbo seco y bulbo húmedo. En la siguiente figura (figura N°18) se puede ver los equipos que se utilizan para las mediciones de agua evaporada.



Figura N°18: Equipos usados para la medición de agua evaporada.

V.3. Condiciones Iniciales de los Condensadores Evaporativos

Las condiciones iniciales de los condensadores a considerar son referentes a las incrustaciones que presentan en la superficie externa de la tubería interna o serpentín de los condensadores evaporativos. En la figura N°19 se pueden observar las incrustaciones que tienen los tubos inferiores, haciéndose visible que la gran mayoría está totalmente recubierto de ese sólido duro. En los tubos intermedios e inferiores la capa de sólidos es mayor llegando a tapar por completo los tubos.



Figura N°19: Imagen de los tubos inferiores del condensador evaporativo con incrustaciones.

Con la finalidad de evaluar el proceso de formación de incrustaciones y de simular el efecto de los intercambiadores anexos a los condensadores, los cuales se encargan de eliminar el sobrecalentamiento del amoníaco, se instalaron duchas de agua dura en las tuberías que alimentan amoníaco a los condensadores.

Después de un mes, el agua rociada formó incrustaciones sobre la superficie, las cuales fueron utilizadas para algunas de las pruebas con los productos químicos.

V.4. Condiciones de las Pruebas con Productos Químicos Desincrustantes

Antes de aplicar el tratamiento desincrustante se realizó un prueba en el laboratorio, con la finalidad de verificar la efectividad de los diferentes productos desincrustantes (AS, AF, D y L), y a partir de esto decidir con cual proveedor se llevaría a cabo el tratamiento desincrustante de los condensadores.

Conociendo la información técnica de los productos, se prepararon las diferentes soluciones a estudiar. Para las cuatro soluciones, cada una con productos diferentes, se utilizó 25ml de agua dura o suave, y 5ml de producto. Las incrustaciones que se usaron provinieron de las tuberías internas y externas del condensador. En cada una de las pruebas se utilizaron diferentes cantidades de incrustaciones, como se indica a continuación:

Prueba N°1: 1g de incrustaciones de la superficie externa de la tubería que está fuera del condensador, en cada una de las soluciones. Se utilizará agua dura.

Prueba N°2: 5g de incrustaciones de la superficie externa de la tubería que está fuera de los condensadores, en cada una de las soluciones. Se empleará agua dura.

Prueba N°3: 2g de incrustaciones de la superficie externa de la tubería que está fuera de los condensadores, en cada una de las soluciones. Se empleará agua suave.

Prueba N°4: 4g de incrustaciones de la superficie externa de la tubería que está dentro del condensador, en cada una de las soluciones. Se usará agua dura.

De acuerdo con la información suministrada por la empresa W, los productos AS y AF pueden ser usados como complementos, aplicando primero AS y una vez culminada la reacción usar AF, con la finalidad de obtener mejores resultados, pero acotándose que de igual forma pueden ser usados por separados. Según esta empresa el producto AF es capaz de disolver y desprender la sílice. Es por esto, que en la prueba N°2, 3 y 4, se realizó este procedimiento utilizando las dos soluciones.

En las cuatro pruebas se evaluaron diferentes parámetros: pH, tiempo en que se disuelven las incrustaciones, cantidad de incrustaciones que queda al final de la reacción, la turbidez y el ensuciamiento que pudieran presentar las soluciones.

V.5. Consideraciones para la determinación de la cantidad de Agua Evaporada en los Condensadores Evaporativos

En la bibliografía consultada mencionan la dificultad que refiere determinar la transferencia de calor en éste tipo de equipos, inclusive se presenta en el (Treybal, 2001), una secuencia de cálculos para un caso muy parecido llegando éste a ser incomprensible a este nivel. Es por esto,

que el estudio se dirigió a buscar una metodología más sencilla, y certera basándose en suposiciones coherentes y aplicables al caso.

Para determinar la cantidad de calor total eliminado se consideró que la mayor cantidad de calor eliminado se debe a la evaporación del agua de enfriamiento, estimándose hasta un 80%, aproximadamente, del calor total eliminado. En esta estimación se consideró que el aire ayuda al enfriamiento del agua y que la posible cantidad de calor que elimina del amoníaco es despreciable frente al efecto que ejerce el agua sobre el mismo.

Cabe destacar, que en el momento en que se hizo la medición del tiempo, se cerró la entrada de agua de reposición al condensador así como la de la purga, de manera que el nivel de agua disminuya por la evaporación solamente.

El área de transferencia de calor es un valor estimado, ya que dentro del condensador existe transferencia entre los tubos y el agua que rodea los tubos, la cual no es uniforme, y el área donde el aire hace contacto con el agua y los tubos. Debido a la complejidad para determinar estas áreas se consideró el área que corresponde a la superficie de los tubos del serpentín, suponiendo que el agua forma una película uniforme alrededor de los tubos.

El criterio de comparación de efectividad se tomó con respecto a la capacidad de diseño que establece el fabricante en cuanto al caudal de agua evaporada. Al valor dado por el fabricante se le aplicó el coeficiente antes mencionado del 80%, el cual toma en cuenta sólo el calor latente del agua, y por un coeficiente que considera la disminución de la densidad del aire debido a la altitud en la que están situados los equipos.

En la medida que se evapora la película de agua ubicada en la superficie de los tubos, se va formando una capa sólida de componentes de magnesio, calcio y sílice, entre otros; los cuales están presentes en el agua de alimentación al Condensador. Esta capa de sólidos que se forma se le da el nombre de incrustaciones. La formación de compuestos carbonato de calcio y magnesio, se ve favorecida cuando las temperaturas son altas, por lo que, en los tubos se encuentran altas concentraciones de estos. En cuanto a la sílice, la solubilidad de esta aumenta en la medida que lo hace la temperatura, ocasionando grandes depósitos en la superficie de los tubos.

V.6. Evaluación de la capacidad de los suavizadores de agua utilizados para las calderas, para alimentar agua suave a los Condensadores

Inicialmente, se hizo una estimación de la cantidad de agua suave que queda libre en el suavizador, considerando el caudal de agua que suaviza, y la cantidad de esa agua que es utilizada por las calderas,

$$\text{Agua sobrante del Suavizador} = \text{Cantidad total de agua suavizada} - \text{Cantidad de agua consumida por las calderas} \quad (18)$$

Para esta estimación se supuso que la capacidad de los suavizadores y las calderas es la máxima, o la suministrada por el fabricante. Cabe destacar, que en Planta Nueva se cuenta con dos suavizadores, los cuales trabajan intercaladamente, por lo que los cálculos se realizaron con un solo suavizador. Además se tienen dos calderas en continuo funcionamiento.

Se debe tomar en cuenta que la capacidad de los equipos ha disminuido debido al uso, corrosión e incrustaciones, en el caso de las calderas; y disminución en la efectividad de la resina de los suavizadores, pudiendo ocasionar un recorte en la disponibilidad de agua suavizada.

Para verificar esto, se implementó un monitoreo diario en el que se inspeccionó el nivel de la piscina de los condensadores cuando se estaba alimentando agua suave a los mismos. Este monitoreo se organizó por períodos, dependiendo de la tendencia que presente el nivel de la piscina.

V.7. Análisis de la calidad del agua a alimentar en los condensadores, y del sistema de flujo a utilizar

Para determinar la calidad del agua a utilizar en la alimentación a los condensadores, se tomó como base un rango mínimo de alcalinidad que debe tener el agua con la finalidad de evitar la corrosión. El valor de alcalinidad del agua debe estar entre 50 y 100ppm como CaCO_3 (The American Water Works Association, 1971).

V.8. Condiciones de las Pruebas con Productos Químicos a utilizar en el Tratamiento Preventivo

En general, en el tratamiento preventivo para condensadores evaporativos se manejan productos químicos como inhibidores de corrosión, inhibidores de incrustaciones y alguicidas.

Las pruebas que se efectuaron en el laboratorio permitieron observar el efecto de dos productos distintos (AT y C), considerando que la operación de cada uno por separado es diferente uno de otro. Cabe destacar, que no se realizaron pruebas con los productos alguicidas debido a que sus efectos son a nivel microscópico.

Estas pruebas constan de la elaboración de tres soluciones, cada una de las cuales fue preparada con las proporciones recomendadas por los

fabricantes. A cada una de estas soluciones se les adicionó una cantidad de incrustaciones del condensador, previamente pesadas, y se dejaron en contacto con la solución por una semana, aproximadamente.

Luego de transcurrida esa semana, se pesaron las incrustaciones, se midió el pH y se observaron los posibles cambios que presentan las soluciones.

Las soluciones de las distintas pruebas se hicieron como se indica a continuación:

Prueba N°1: se agregan 2ml del producto E en 180ml de agua suave.

Prueba N°2: se agregan 2ml del producto AT en 360ml de agua suave.

Prueba N°3: se agregan 2ml del producto E y 2ml del producto AT en 500ml de agua suave.

Se midió el pH de las pruebas en cuatro días distintos, y se pesaron las masas de las incrustaciones antes de agregarlas, y al finalizar la semana de experimentación.

V.9. Estudio del Sistema de Flujo para la implementación de un sistema dosificador de productos

Una vez decididos los productos que se aplicaron para el tratamiento preventivo, se estudió el sistema de flujo aplicando conocimientos de mecánica de fluidos, considerando la utilización de una bomba de alimentación presente actualmente. La dosificación de productos químicos se realizó para los dos condensadores evaporativos y de manera simultánea.

V.10. Realización de análisis de agua para el control de corrosión, incrustaciones y ensuciamiento

Una vez ejecutado el tratamiento desincrustante, se implantó una serie de análisis de agua para llevar un control en el desprendimiento de sólidos de las tuberías, así como para prevenir posibles nuevas incrustaciones y corrosión.

Los análisis que se llevaron a cabo son: pH, sólidos disueltos, alcalinidad total y dureza total. Las metodologías para determinar dichos parámetros, pueden ser consultadas en el Standard Methods for the examination of water and Wastewater. Estos análisis se harán diariamente en la empresa a fin de mantener el control y poder establecer acciones correctivas a tiempo.

V.11. Determinación de purgas continuas o periódicas a realizar en los condensadores

La determinación de las purgas va a depender de la cantidad de sólidos que tenga el agua de la piscina y el agua de reposición, con el propósito de mantener una concentración de sólidos adecuada en la piscina del condensador.

En el momento en que se quiera determinar el caudal de purga, se debe realizar los análisis de sólidos disueltos para el agua de la piscina y para el agua de alimentación a los condensadores, y emplear balances de masa global y por componente.

CAPÍTULO VI

PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS DE LAS EVALUACIONES REALIZADAS

A continuación se presentan los diferentes resultados obtenidos durante el desarrollo del plan de trabajo, con la finalidad de alcanzar los objetivos propuestos.

VI.1. Resultados del caudal de agua evaporada estimado en los condensadores evaporativos antes de realizar el tratamiento desincrustante.

La estimación del caudal de agua evaporada que presentan los condensadores permite evaluar la cantidad de incrustaciones que presentan los mismos. Para esto, se realizaron mediciones de nivel de agua en la piscina y el tiempo de evaporación. Esta metodología se encuentra detallada en el apéndice B.

Una vez realizadas las mediciones de temperaturas, tiempo y alturas en la piscina del condensador, se procedió a determinar el caudal de agua evaporada en los equipos, con la finalidad de medir las condiciones iniciales de operación del equipo, empleando una alimentación de agua dura.

De las 14 mediciones realizadas, en 10 se evaluaron el efecto de la variación de carga térmica en el proceso de refrigeración sobre la cantidad

de agua evaporada por cada condensador, tomando mediciones por la mañana y por la tarde, aproximadamente a la misma hora cada una.

En la figura N°20 se observan las variaciones de los caudales de agua evaporada en los condensadores obtenidos en las diferentes mediciones antes mencionadas, así como el caudal de diseño suministrado por el fabricante.

Se puede ver que en los condensadores, los valores de caudal promedio se encuentran por debajo del valor de diseño en un 51% para el condensador #1 y en 53% en el #2, aproximadamente. Estos valores permiten verificar la deficiente calidad de la transferencia de calor en el sistema, y a su vez el grado de incrustaciones presentes en los equipos, operando estos, aproximadamente, al 50% de su capacidad de diseño.

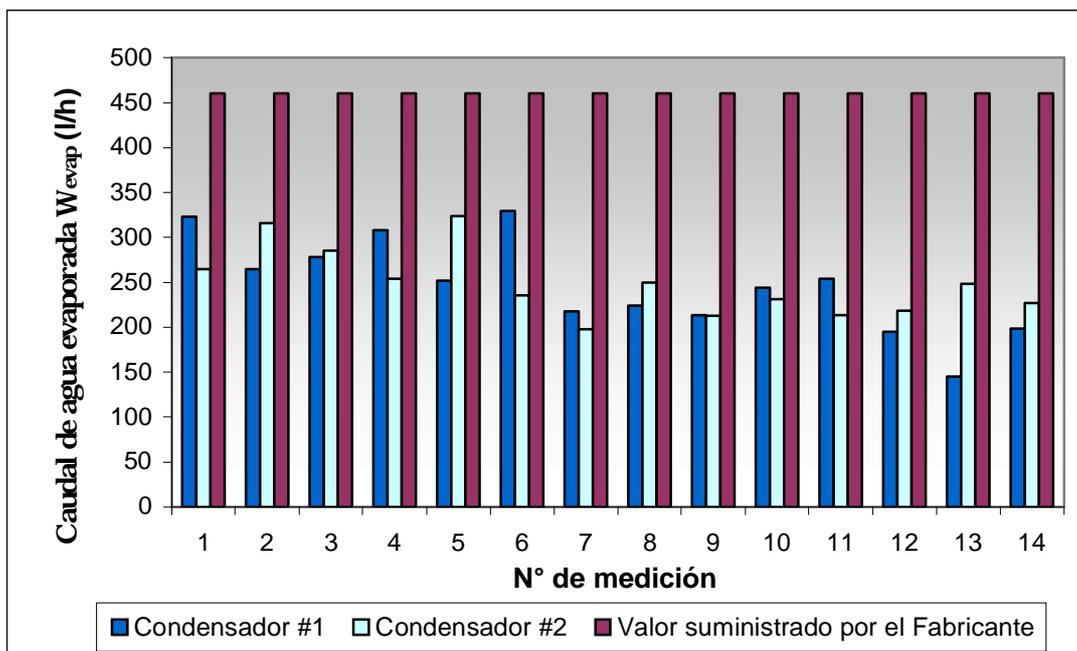


Figura N°20: Gráfico de caudales de agua evaporada obtenidos antes de realizar el tratamiento químico desincrustante.

En la figura N°21 y figura N°22 se presentan valores de caudales de agua obtenidos con las mediciones de altura y tiempo en ambos condensadores, durante diferentes días y en horas de la mañana y tarde, respectivamente.

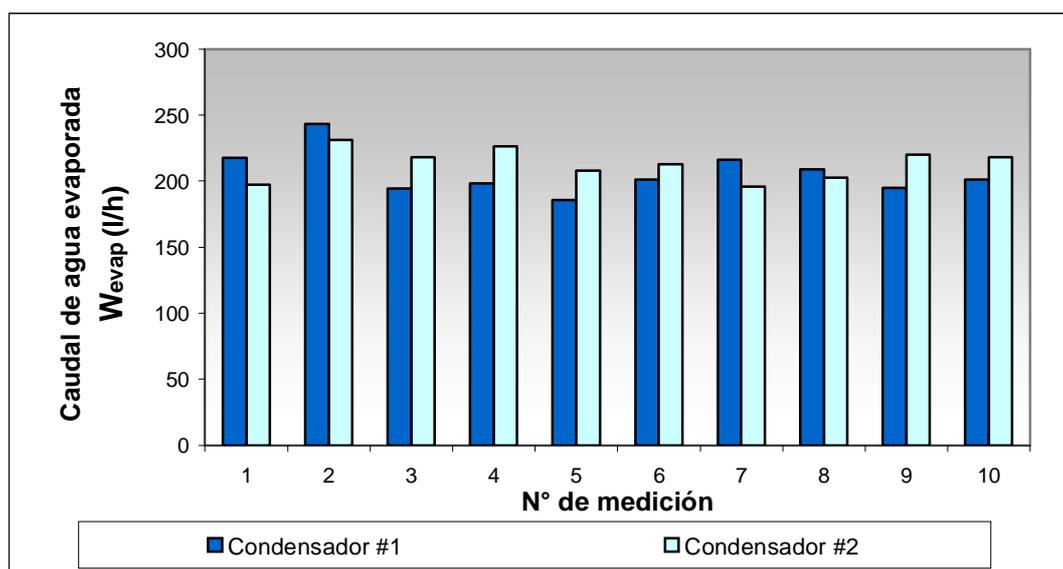


Figura N°21: Gráfico de caudales de agua evaporada en horas de la mañana obtenidos antes de realizar el tratamiento químico desincrustante.

Durante horas de la tarde se presenta un incremento promedio del 25%, aproximadamente, de agua evaporada con respecto al valor medio de la mañana.

Esta diferencia se debe, principalmente, al aumento de la carga de amoníaco en los condensadores, ya que las paredes de las cavas colindan con la parte externa de la Planta, generando un mayor requerimiento de etilenglicol para el enfriamiento de dichas cavas, y por ende mayor cantidad de amoníaco condensado en el sistema de refrigeración, por lo que los condensadores evaporan mayor cantidad de agua para cubrir

estos requerimientos. Hay que recordar que el amoníaco enfría el etilenglicol en los chillers.

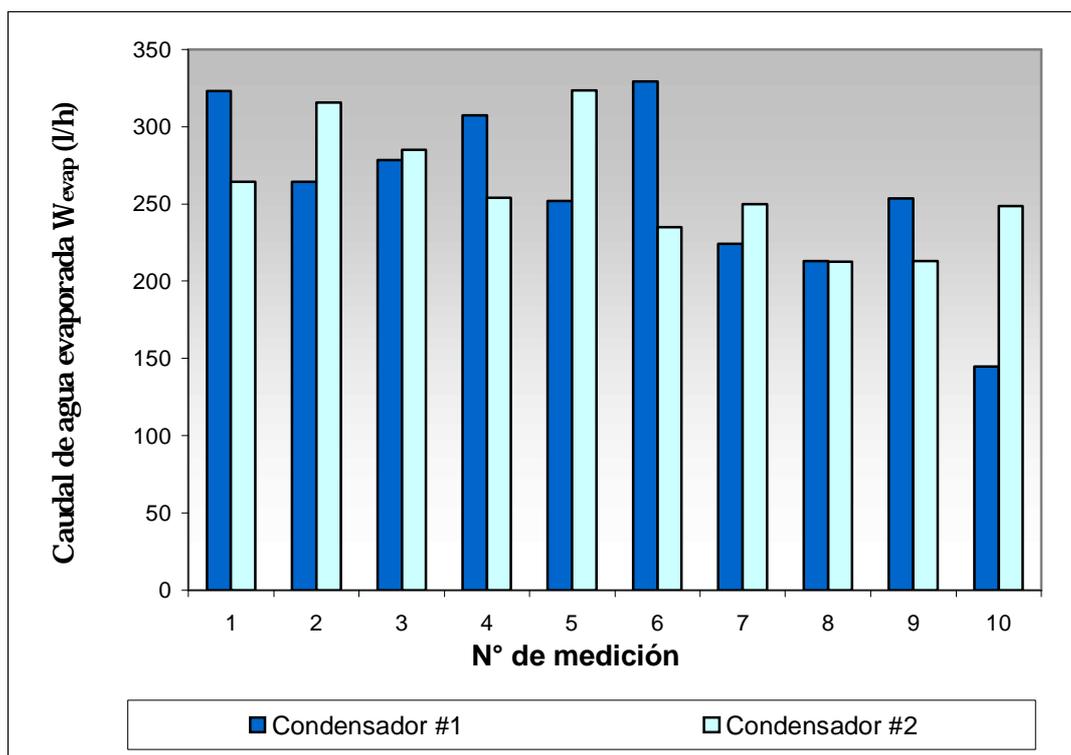


Figura N°22: Gráfico de caudales de agua evaporada en horas de la tarde obtenidos antes de realizar el tratamiento químico desincrustante.

En la figura N°23 se presentan comparaciones entre los flujos de calor absorbido por el agua en el condensador #1 y #2, y el valor de diseño suministrado por el fabricante.

Como sucede con los caudales de agua evaporada, los flujos de calor absorbidos, para ambos condensadores, son sólo un 54% respecto del flujo de calor que absorbe el equipo en su estado inicial. Esta tendencia tiende a ser equivalente con los caudales de agua evaporada, ya que estos flujos

de calor dependen directamente de la cantidad de agua evaporada por el condensador.

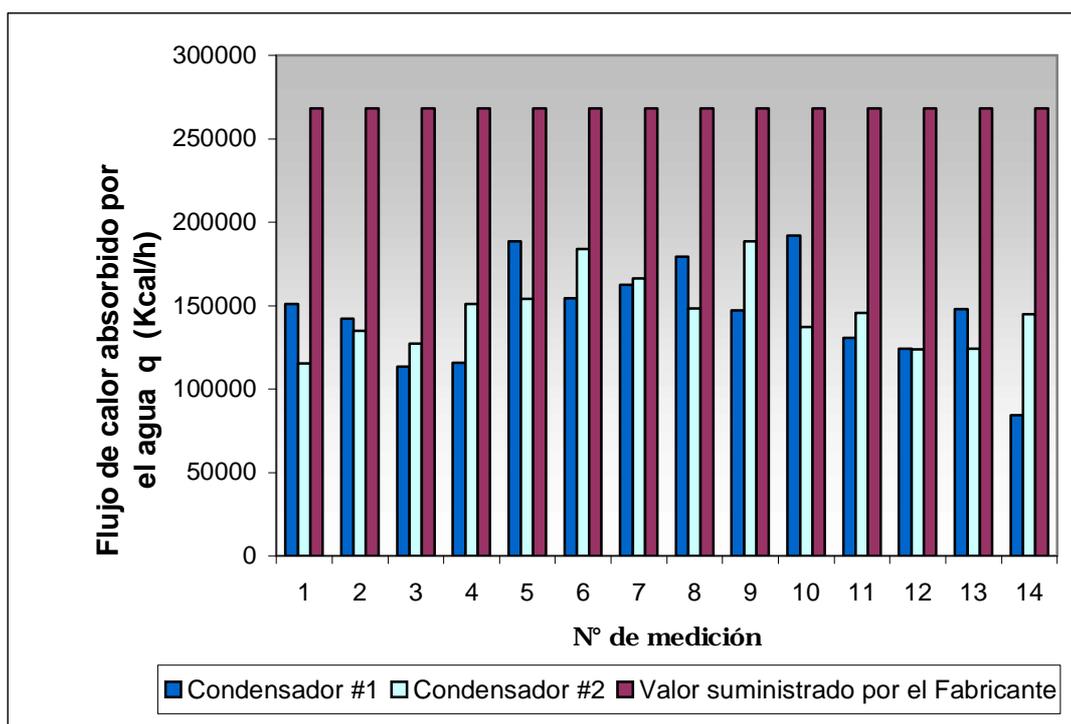


Figura N°23: Gráfico de flujos de Calor absorbidos por el agua, obtenidos antes de realizar el tratamiento químico.

VI.2. Resultados de las Pruebas de Laboratorio para el Tratamiento Desincrustante.

Una vez estimada la capacidad de transferencia de calor en los condensadores, siendo ésta el 50%, se decidió realizarles un tratamiento desincrustante con la finalidad de aumentar dicha capacidad.

Antes de aplicar el tratamiento desincrustante se realizaron una serie de pruebas en el laboratorio, respecto a la efectividad de los distintos productos

desincrustantes posibles de utilizar. Adicionalmente, se hizo un análisis de las cotizaciones de las posibles inversiones que requería cada uno de los tratamientos.

Para las pruebas se prepararon las soluciones con agua dura y los productos químicos a las concentraciones recomendadas por los proveedores. A cada una de estas soluciones se le añadió una cantidad determinada de incrustaciones indicada por el personal técnico, las cuales son obtenidas del condensador (tuberías internas y externas). Se observó la reacción de las cuatro soluciones sobre las incrustaciones. Se estudiaron cuatro productos desincrustantes: dos de la empresa W (AS y AF), uno de la empresa E (D) y L de la empresa L.

En cada una de las pruebas se utilizaron diferentes cantidades de incrustaciones, como se indica a continuación. Cabe destacar, que las incrustaciones externas se encontraban en tuberías externas al equipo, y presentando un espesor 80% menor que las que se encuentran en los tubos del serpentín.

Prueba N°1: 1g de incrustaciones de la superficie externa de la tubería que está fuera del condensador, en cada una de las soluciones. Se utilizará agua dura.

Prueba N°2: 5g de incrustaciones de la superficie externa de la tubería que está fuera de los condensadores, en cada una de las soluciones. Se empleará agua dura.

Prueba N°3: 2g de incrustaciones de la superficie externa de la tubería que está fuera de los condensadores, en cada una de las soluciones. Se empleará agua suave.

Prueba N°4: 4g de incrustaciones de la superficie externa de la tubería que está dentro del condensador, en cada una de las soluciones. Se usará agua dura.

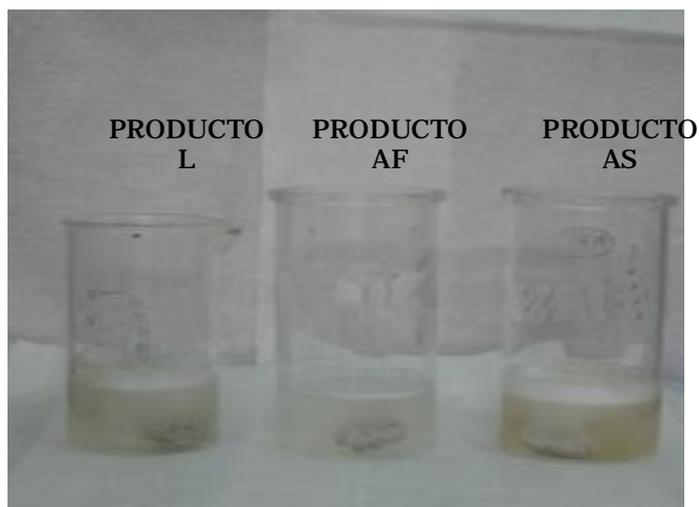
En las cuatro pruebas se evaluaron diferentes parámetros: pH, tiempo en que se disuelven las incrustaciones, cantidad de incrustaciones que queda al final de la reacción, la turbidez y el ensuciamiento que puedan presentar las soluciones.

Entre la caracterización de las aguas que utiliza INACOR para alimentar a los equipos, ésta tiene un alto contenido de sílice, por lo que se consultó algún producto que la pudiese eliminar. En todas las empresas consultadas mencionaban lo complicado de conseguir un producto que la eliminase. Sin embargo, la empresa W ofreció dos productos que podrían ser complementarios para un tratamiento desincrustante, aplicándose primero el AS para aflojar los sólidos y luego el AF para eliminar compuestos con contenido de sílice, pero era elección de la empresa INACOR si utilizar uno de los dos o los dos en el tratamiento a realizar.

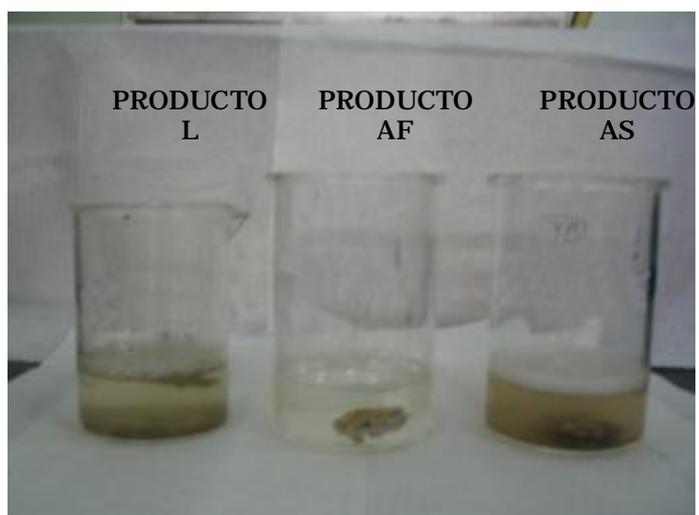
En la figura N°24 se presentan los envases con las soluciones preparadas (a), las reacciones sobre las incrustaciones (b) y finalizando la reacción (c).



(a)



(b)



(c)

Figura N°24: Soluciones con los diferentes tratamientos desincrustantes. (a) Antes de agregar las incrustaciones. (b) Durante la reacción con las incrustaciones. (c) Después de culminada la reacción.

Como se puede observar en la figura N° 24 (b) y (c), la solución con el producto AS fue la que presentó una velocidad de reacción mayor, haciéndose apreciable por la cantidad de espuma que originó, comparándose con las otras soluciones. Así mismo, se observa la reacción desfavorable por la poca reactividad del producto AF sobre la incrustación.

Por otra parte, en la tres soluciones se presentan sólidos suspendidos, pero en la AS la cantidad era tal, que la solución se tornó de color marrón.

En general, el comportamiento de las soluciones en las diferentes pruebas tuvo la misma tendencia. En la tabla N°3 se presentan los resultados de dichas pruebas.

La base de la prueba consistió en la disolución de la incrustación en la solución. En el caso del producto AF, sólo se consideró un 10% de disolución, debido a que el efecto de dicha solución sobre la masa introducida era prolongado y se requería de mucho tiempo para visualizar los resultados.

Adicionalmente, en cada una de las pruebas se utilizaron diferentes tipos de incrustaciones, con la finalidad de observar el efecto de las soluciones sobre incrustaciones de distintos espesores.

El pH inicial de todas las soluciones en cada prueba fue de 1,0, debido a que estos productos contienen un 90% de ácidos fuertes. Al finalizar las reacciones las soluciones con el producto D mantuvieron su pH de 1,0; sin embargo, las soluciones con AS y L alcanzaron pH de 4,0.

Presentación y Discusión de los Resultados

Desde un primer plano se descartó el producto AF como consecuencia de la poca disolución (10%) en tiempos cercanos a los otros productos, pero con la diferencia de que estos últimos se disolvieron en un 100%, aún tomando en cuenta la posibilidad de que eliminara la sílice contenida en los equipos.

Tabla N°3: Tabla de resultados de las pruebas de los tratamientos desincrustantes para los condensadores evaporativos.

| | PRUEBA N°1 (1g de incrustación) | | PRUEBA N°2 (5g de incrustación) | | PRUEBA N°3 (2g de incrustación) | | PRUEBA N°4 (4g de incrustación) | |
|--------------------|------------------------------------|--------------------|------------------------------------|--------------------|------------------------------------|--------------------|------------------------------------|--------------------|
| | t (min) | % Inc. Disuelto |
| Producto D | 17 | 100 | 105 | 100 | 33 | 100 | 107 | 100 |
| Producto AS | 13 | 100 | 65 | 100 | 14 | 100 | 82 | 100 |
| Producto AF | 26 | 10 | 47 | 10 | 33 | 10 | 63 | 10 |
| Producto L | 15 | 100 | 71 | 100 | 19 | 100 | 88 | 100 |

Para la prueba N°4 se empleó incrustaciones con un espesor 80% mayor, que las utilizadas en las pruebas N°1, N°2 y N°3

t: tiempo de reacción de la incrustación en la solución química (min)

% Inc. Disuelto: Porcentaje de incrustación que se disolvió en la solución.

Se pudo observar que la solución con el producto AS fue la que presentó una velocidad de reacción mayor, tomando en cuenta que los productos D y L actúan sobre las incrustaciones de manera favorable.

Presentación y Discusión de los Resultados

En la prueba realizada con incrustaciones de los tubos internos del condensador (Prueba N°4), se observó un mayor tiempo de la reacción, como consecuencia de un mayor espesor de las incrustaciones, siendo más difícil para el producto disolver las mismas. Adicionalmente, durante la reacción se desprendieron varios sólidos de las incrustaciones presentándose al final como sólidos suspendidos en la solución.

En la siguiente tabla (tabla N°4) se presentan los costos de cada tratamiento desincrustante con cada uno de los productos considerados por las diferentes empresas.

Tabla N°4: Evaluación de costos para el Tratamiento Químico Desincrustante.

| | EMPRESA E | EMPRESA W | | EMPRESA L |
|---------------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| PRODUCTO A UTILIZAR | D | AS | AF | L |
| CANTIDAD DE PRODUCTO A UTILIZAR | 40 kg | 60 l | 60 l | 50 kg |
| PRECIO | 4419 Bs/kg | 837.824 Bs | 1.203.093 Bs | 3.700 Bs/kg |
| PRECIO TOTAL DE PRODUCTO | 176.760 Bs | 837.824 Bs | 1.203.093 Bs | 370.000 Bs |
| PRECIO TOTAL DEL TRATAMIENTO | 176.760 Bs | 2.040.917 Bs | | 370.000 Bs |

Como se puede notar, las tres empresas evaluadas presentan presupuestos muy diferentes, esto depende mayormente de la efectividad y de los tipos de ácidos añadidos a cada producto.

Una vez realizadas las pruebas en el laboratorio, y haber estudiado cada uno de los presupuestos propuestos se decidió realizar el tratamiento desincrustante con el producto AS, porque los efectos sobre las incrustaciones resultaron más favorables y el costo se encontraba dentro de los parámetros establecidos por la disponibilidad de la empresa. Como se dijo anteriormente, adicionalmente se ofrece otro producto (AF) que sirve como complementario del AS, pero de acuerdo con los resultados del laboratorio, este producto no actuó eficazmente sobre las incrustaciones, empleando mucho tiempo de disolución para poca cantidad de incrustación, por lo que se decidió utilizar únicamente el AS.

VI.3. Resultados del caudal de agua evaporada estimado en los Condensadores Evaporativos luego del Tratamiento Químico Desincrustante.

Tomando en consideración los resultados anteriores, se aplicó el tratamiento desincrustante a los condensadores, utilizando el producto AS. El tratamiento se realizó añadiendo un determinado volumen del producto en la piscina del condensador, de acuerdo con las especificaciones dadas por los técnicos de la empresa presentes.

Una vez añadido, se dejó recirculando midiendo el pH cada 20 minutos a fin de verificar el momento en que el pH sea 7. En ese momento, se agregó otro volumen igual del producto, y así hasta terminar la carboya o tambor comprado. Al finalizar el tratamiento desincrustante en los condensadores, se procedió a destaparlos y observar internamente el resultado del mismo. Adicionalmente, se determinaron los caudales de agua evaporada a fin de verificar los posibles cambios ocurridos.

En la figura N°25 se presentan los caudales de agua evaporada obtenidos después del tratamiento químico desincrustante. Allí se observa que aún después del tratamiento desincrustante realizado, la capacidad de los condensadores se encuentra alejada de la capacidad de diseño.

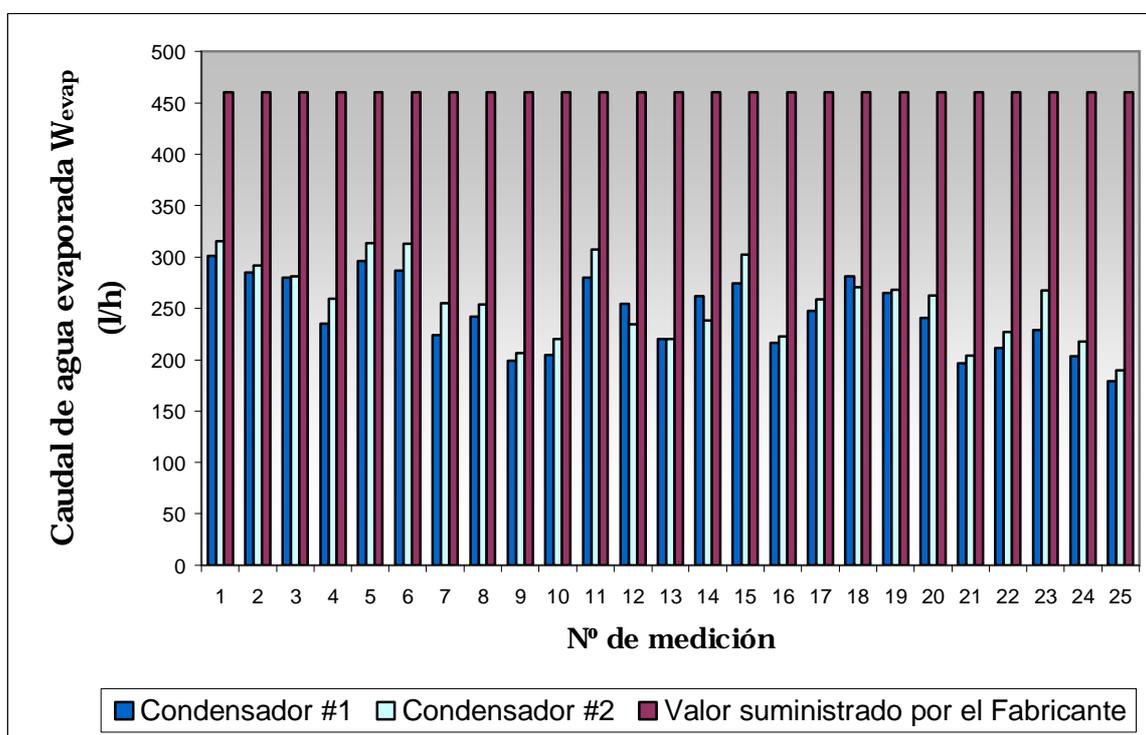


Figura N°25: Gráfico comparativo de los caudales de agua evaporada para el condensador #1, #2 y valor del fabricante del equipo, después de haber realizado el tratamiento químico desincrustante.

Con respecto al valor comparativo, el cual es el caudal de agua evaporada suministrado por el fabricante en el momento de adquirir el equipo, el condensador #1 se encuentra en un 53% y el #2 por 56% de dicho valor; lo que permite ver que la diferencia entre los caudales antes y después de realizar el tratamiento, es prácticamente despreciable. Esta poca diferencia después del

Presentación y Discusión de los Resultados

tratamiento químico pudo deberse a que las incrustaciones se encontraban tan fuertemente adheridas a las paredes de los tubos, como consecuencia del tiempo que tienen allí, que su efectividad sobre las mismas fue insignificante. Así mismo, pudo ocurrir que el tiempo de contacto de la solución sobre los tubos, indicado por los técnicos que venden el producto, no fue suficiente dado el grosor de los sólidos.

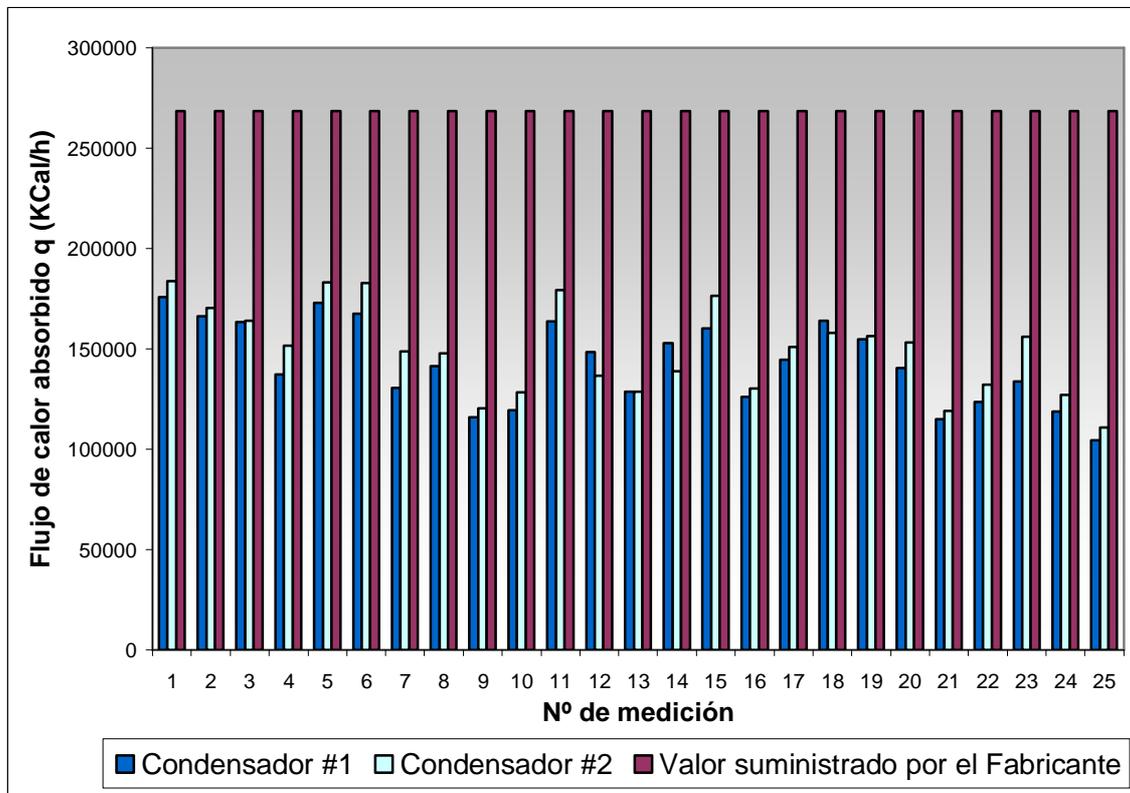


Figura N°26: Gráfico de flujos de calor absorbido por el agua en el condensador #1 y #2 después del tratamiento químico desincrustante realizado.

En la figura N°26 se presentan los calores absorbidos por el agua en cada una de las mediciones realizadas. Los flujos de calor, al igual que los caudales de agua evaporada, presentan pocas variaciones entre los resultados antes y después del tratamiento. En ambos casos, los valores

están por los alrededores del 55%, presentando diferencias entre, el antes y el después, del 2%.

De acuerdo con los resultados obtenidos de las mediciones realizadas después del tratamiento desincrustante, éste no fue suficiente para que los condensadores operen en condiciones favorables llevando a cabo la condensación del amoníaco de acuerdo con la capacidad requerida.

Como se mencionó en el punto VI.2., en la aplicación de estos productos se liberan cierta cantidad de sólidos quedando éstos suspendidos en el agua, ocurriendo de igual manera una vez concluido el tratamiento desincrustante. Este efecto pudo ser consecuencia de la sobresaturación de la solución aplicada.

VI.4. Evaluación de la capacidad de los suavizadores empleados para las calderas, para alimentar los Condensadores Evaporativos.

Desde el momento en que se comenzó con el estudio, se analizó el sistema de agua para alimentar agua suave a los condensadores, con la finalidad de evitar el aumento en la formación de incrustaciones y poder aplicar los distintos tratamientos obteniendo un mejor funcionamiento de los mismos.

Para comenzar se hizo una estimación de la cantidad de agua suave que queda libre en el suavizador, tomando en cuenta el caudal de agua suavizada que sale del suavizador y los caudales de las calderas (dos calderas en total) a las que alimenta. Luego, este resultado se comparó con los caudales necesarios a alimentar en los condensadores.

Partiendo de datos de diseño por parte del fabricante de los condensadores evaporativos, estos equipos deben liberar 1617 Mbtu/h, representando esto una cantidad aproximada de 460 l/h de agua evaporada, cada uno. Conociendo el caudal de agua que suministra el suavizador, se puede decir que del total de agua suavizada, el 69% es utilizada por las calderas y el 14% por los condensadores evaporativos, quedando un sobrante del 17% de agua suavizada (suponiendo que los equipos están nuevos).

Es importante considerar que tanto la capacidad de los suavizadores, como de las calderas y los condensadores no son la máxima debido al deterioro de los mismos por el tiempo de uso, por lo que, sus caudales estarán por debajo de los valores supuestos.

Para tener mayor seguridad en que el suavizador cubre la demanda requerida, se realizó un monitoreo diario enviando agua suavizada a los condensadores evaporativos e inspeccionando el nivel de las piscinas de los equipos en diferentes períodos, con la finalidad de observar el comportamiento del sistema.

Inicialmente, se comenzó con períodos de 20 min, observando respuestas favorables en los niveles, inclusive aumentos. Posteriormente, se realizó cada 1 hora, luego cada 8 horas y así por un día y dos días. De aquí, se decidió que la capacidad de los suavizadores es suficiente para alimentar las dos series de equipos planteados (calderas y condensadores). Se habla de suavizadores porque en la Planta Nueva se cuenta con dos, pero éstos operan alternadamente, por lo que se considera como si sólo existiera uno.

En la figura N°27 se observa la variación de los niveles en los condensadores utilizando como alimentación agua suave.

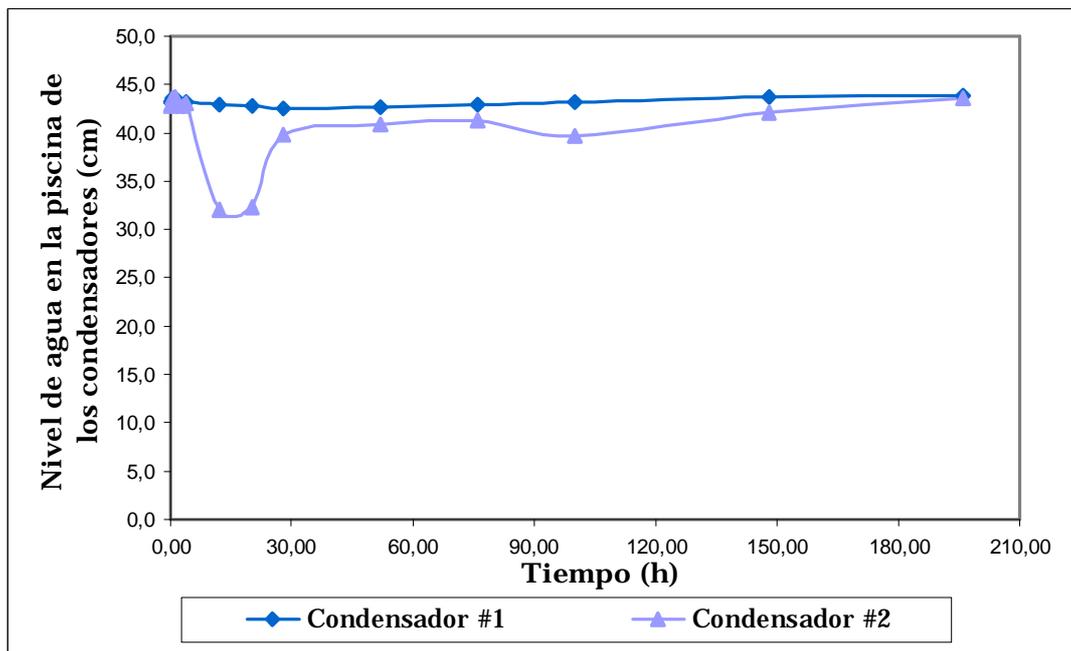


Figura N°27: Variación de los niveles de agua en los condensadores alimentando agua suave a los mismos.

Las variaciones que se muestran son del 3%, aproximadamente, respecto del valor promedio del volumen de la piscina de cada condensador, llegando a ser un valor aceptable debido a que se mantienen dentro de los rangos operación y funcionamiento de los equipos.

De acuerdo con todo el análisis realizado, no es necesario adquirir un suavizador nuevo para alimentar a los condensadores evaporativos de Planta Nueva.

VI.5. Evaluación de la alimentación a los condensadores usando agua suave o una mezcla entre agua suave y agua dura.

En los sistemas de enfriamiento el suministro de agua es un factor muy importante, debido a que si se realiza continuamente con agua dura puede ocasionar grandes inconvenientes por la formación de incrustaciones; y si por el contrario, la alimentación es con agua suave, el problema podría ser la corrosión (Lipesa, 1998).

Entre las incrustaciones y la corrosión, el más controlable es la corrosión, ya que con el uso de productos inhibidores de corrosión la acción del agua suave sobre los tubos se minimiza significativamente. Es por esto, y basándose además en el funcionamiento de otros condensadores que se encuentran en la Planta de la empresa, se puede utilizar el agua suave como alimentación a los condensadores de Planta Nueva, pero utilizando adicionalmente los productos químicos adecuados, de manera automática, a fin de evitar problemas de corrosión e incrustación en los mismos, así como purgas periódicas o continuas dependiendo del sistema (Ver apéndice C).

En la figura N°28 se presenta un diagrama de flujo del sistema de alimentación de agua suave a los condensadores de Planta Nueva.

VI.6. Sistema de alimentación de agua suave a los Condensadores Evaporativos de Planta Nueva.

Se investigó el uso de agua suave únicamente, o alguna mezcla de agua suave con agua dura a una determinada proporción. Se recurrió a las referencias bibliográficas relacionadas con el tratamiento de aguas (Lipesa,

1998), y a las asesorías técnicas que puedan suministrar los proveedores de los productos químicos para aguas.

De todo lo investigado se pensó en alimentar una mezcla de agua suave con agua dura a los condensadores evaporativos en una proporción 70% de agua suave y 20% de agua dura, para lo que se estudió los costos de tanques, bombas y demás implementos necesarios para el sistema planteado, pero como en este momento no se cuenta con los recursos económicos necesarios, se decidió posponer la instalación de este sistema para el momento que decida la empresa sea el más apropiado.

A partir de esto, se estudió el sistema de flujo para alimentar agua suave a los condensadores. Para esto fue necesario analizar el sistema de flujo determinando las tuberías, válvulas y bombas actuales, y las que eran necesarias colocar. Y a partir de esto, se recomendó instalar el sistema de tubería que se muestra en la figura N° 28 (color rojo).

De acuerdo con el diagrama, a los condensadores se le puede alimentar agua dura o agua suave dependiendo de las necesidades y disponibilidad del recurso. En este caso, se emplean tuberías de diámetro nominal de 1 plg y una válvula check de manera que el agua suave llegue a los equipos.

Con este sistema que se presenta, se va a alimentar agua suave de manera continua, y en el momento de regenerar los suavizadores o durante el llenado de alguna de las calderas, se debe abrir la válvula para el paso de agua dura a los equipos.

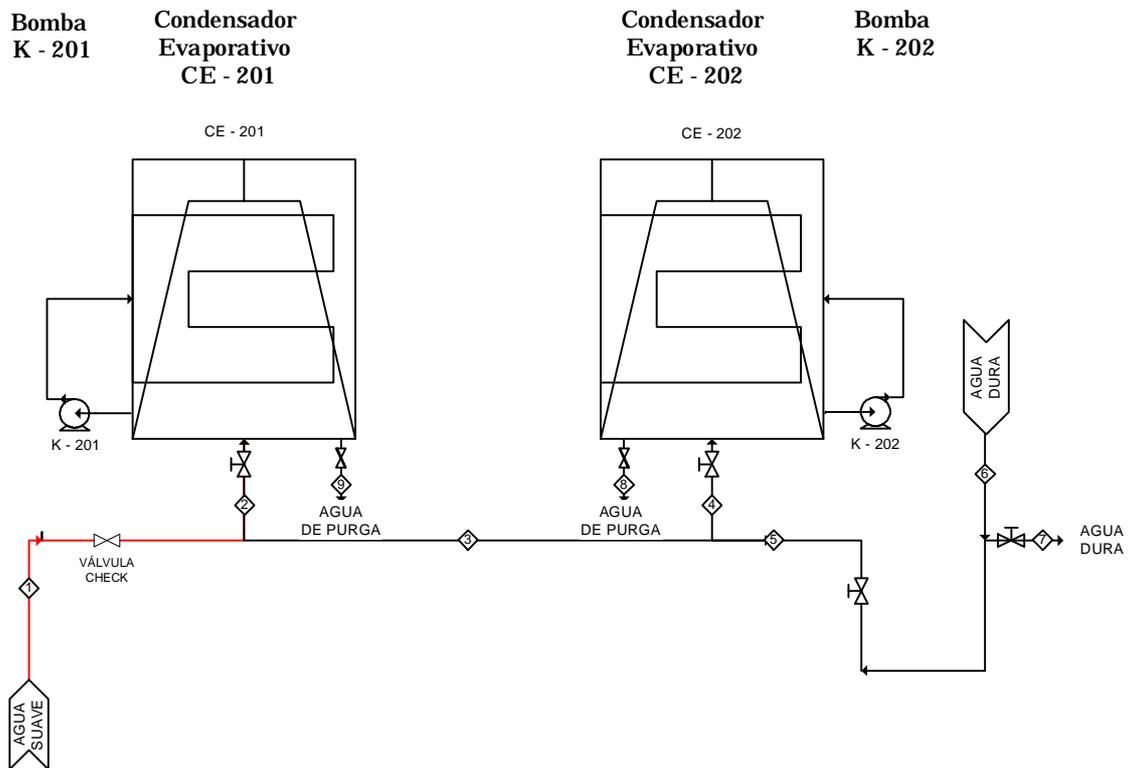


Figura N°28: Diagrama de Flujo del Sistema de alimentación de agua suave a los condensadores evaporativos de Planta Nueva.

VI.7. Resultados de los Análisis de agua de las purgas para verificar la liberación de sólidos de los tubos de los equipos.

En un condensador evaporativo se debe cuidar el contenido de sólidos totales disueltos (STD), así como la dureza del agua con la finalidad de minimizar la posibilidad de formación de incrustaciones en la parte interna del equipo.

Por lo general, el agua suave que se utiliza en la Planta presenta un contenido de sólidos disueltos alrededor de 355ppm como sólidos disueltos (medidos en el laboratorio de la empresa), siendo éste un punto importante de comparación. Por otra parte, se conoce por teoría que el agua suave debe tener una dureza de cero, lo que permite establecer ciertas deducciones de los resultados obtenidos (Lipesa, 1998).

Durante la realización de estos análisis se aplicó producto dispersante días antes de algunas mediciones realizadas (medición N° 2, 6, 10 y 16). Por otra parte, se estaba alimentando agua suave a los condensadores evaporativos.

Como se puede ver en la figura N°29, los picos más pronunciados se debieron al efecto causado sobre el sistema cuando se aplicó un dispersante de lodos, esto porque estos productos se encargan de disolver los sólidos presentes en el equipo y una vez que se satura el agua los sólidos precipitan. En el momento en que parte de los sólidos se disuelven, la dureza del agua aumenta, como consecuencia del aumento en el contenido de compuestos de calcio y magnesio provenientes de las incrustaciones.

En el agua suave se puede disolver cierta cantidad de sólidos (compuestos de calcio y magnesio) con mayor facilidad, ocasionando en la misma, un aumento de la dureza. En el proceso de suavización del agua, ésta intercambia iones de Ca y Mg con la resina, ganando por el contrario iones de Na. En el momento de entrar en contacto con alto contenido de compuestos con Ca y Mg como son las incrustaciones, estos iones vuelven a intercambiarse diluyéndose en el agua y haciendo que ésta aumente el contenido de sólidos disueltos y su dureza.

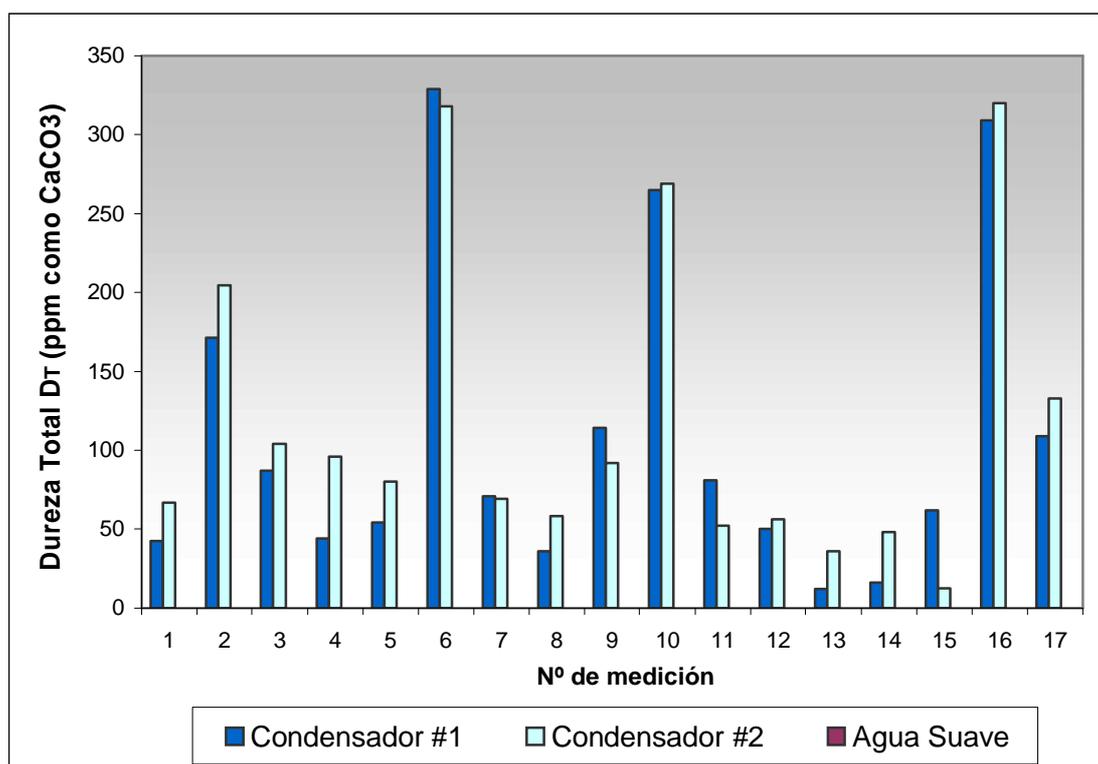


Figura N°29: Representación gráfica de la dureza total en los condensadores evaporativos después del tratamiento desincrustante.

Por lo que se puede pensar, que con el dispersante y la remoción constante del agua en el condensador, la capacidad para aflojar las incrustaciones del tubo aumentó un 300% respecto al funcionamiento con agua suave únicamente, ayudando así a la eliminación de ciertas cantidades de los mismos.

En la figura N°30 se puede observar la variación de los sólidos disueltos en las muestras de agua que se analizaron.

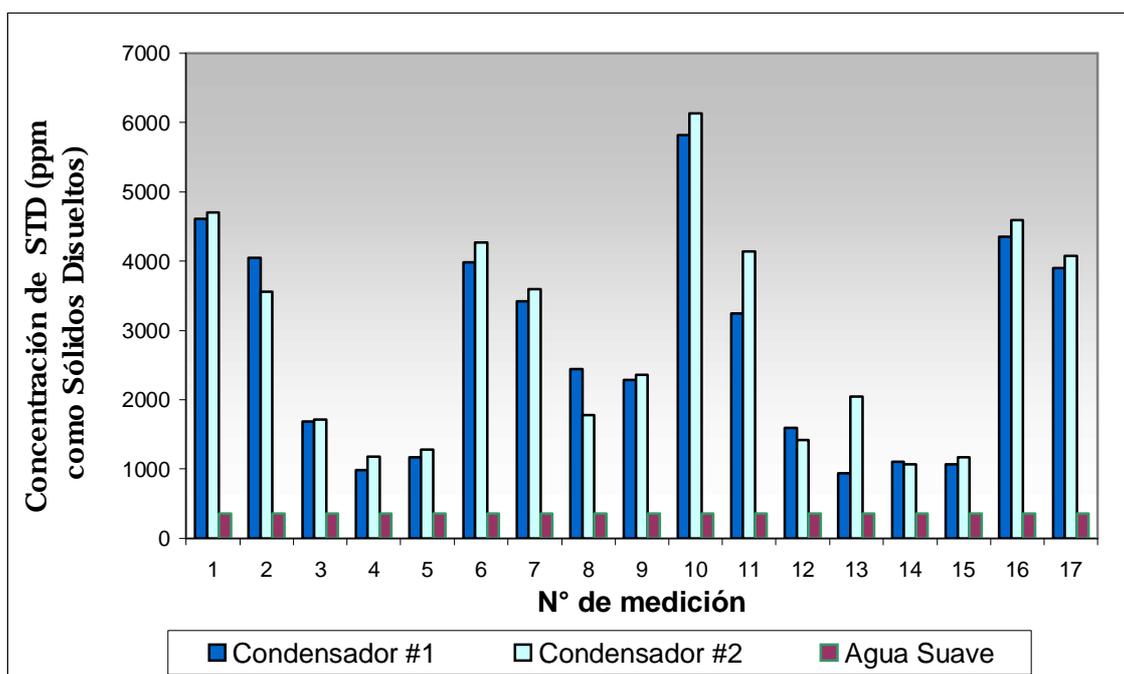


Figura N°30: Representación gráfica de los sólidos totales disueltos en los condensadores evaporativos después del tratamiento desincrustante.

Una vez más se puede ver el efecto del agua suave junto con los productos químicos, como influyen en la eliminación de sólidos incrustantes, sobre todo cuando se utiliza productos dispersantes, siendo esto visible en los picos más altos (mediciones N° 1, 2, 6, 7, 10, 11, 16 y 17).

El producto químico dispersante se agregó directamente en la piscina del condensador, de acuerdo con las especificaciones dadas por el fabricante del mismo.

Una vez agregado, el producto queda recirculando dentro del equipo disolviendo y suspendiendo los sólidos en la medida que se evapora el agua. Como consecuencia, aumenta la concentración de los sólidos en la piscina.

Por otra parte, en las purgas que se realizan a los equipos, se elimina agua concentrada de sólidos y se repone con agua limpia, lo que ocasiona una disminución en la concentración dentro del equipo, reflejándose en las mediciones N° 2, 7 11 y 17, ya que estos decrecen.

Es importante considerar, que para eliminar en poco tiempo gran cantidad de las incrustaciones presentes, el uso de agua suave y dispersantes de lodos no es eficiente, debido a que este sería un proceso muy lento y donde necesitaría invertir para la adquisición de dicho producto.

Considerando, que los condensadores operan a la mitad de su capacidad debido al nivel de incrustaciones, se hace imprescindible realizar tratamiento mecánico para la eliminación de la misma, siendo esto un procedimiento de sumo cuidado a fin de evitar inconvenientes sobre la estructura física de los mismos.

VI.8. Resultados del Tratamiento Mecánico realizado a los Condensadores Evaporativos.

El tratamiento mecánico fue realizado parcialmente, durante un período largo de tiempo, por una sola persona, durante horas laborales y sin desarmar el equipo, por lo que la limpieza se realizó por varios meses, en un 75% para el condensador #2 y 55% para el #1, aproximadamente.

A este nivel de limpieza, se realizaron mediciones para determinar el caudal de agua evaporada. A continuación, en la figura N°31 se presenta la gráfica correspondiente a los caudales de agua evaporada para el condensador #1, #2 y comparándolos con el valor suministrado por el fabricante, en cada una de las mediciones realizadas.

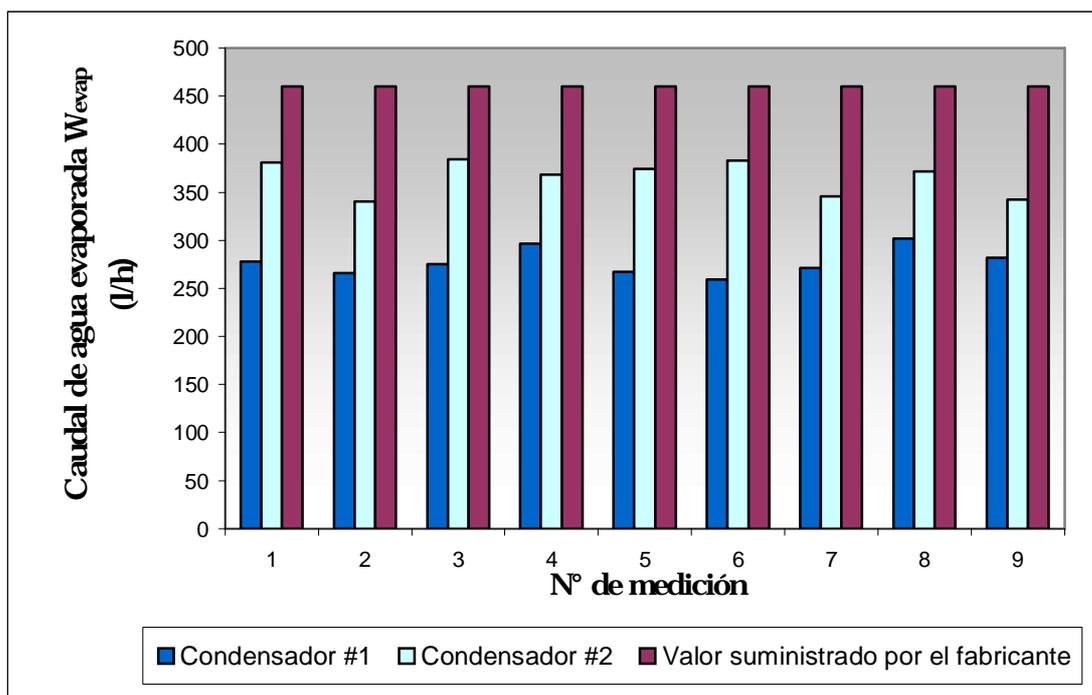


Figura N°31: Gráfico comparativo de los caudales de agua evaporada después de haber realizado el tratamiento mecánico en los condensadores.

Los caudales de agua evaporada para ambos condensadores, después del tratamiento mecánico, aumentaron llegando a estar a un 60% para el condensador #1 y 80% en el #2, comparándose con el valor de diseño de los equipos.

Si se considera que la limpieza realizada no fue en su totalidad alcanzada y la capacidad de los condensadores aumentaron en un 15%, aproximadamente, dicha capacidad puede seguir aumentando en la medida que continúen los trabajos de limpieza mecánica, pudiendo mejorar el funcionamiento del sistema completo, disminuyendo las temperaturas en los compresores y chillers para así obtener una temperatura adecuada en el Etilenglicol empleado en las cavas de refrigeración.

VI.9. Resultados de las pruebas del tratamiento preventivo.

Una vez que se alimenta agua suave a los condensadores y se ha realizado aproximadamente un 60% del tratamiento mecánico, se pondría en funcionamiento un sistema de alimentación de productos químicos para el tratamiento preventivo, por lo que fue necesario evaluar diferentes productos de diferentes empresas químicas.

Para establecer el tratamiento preventivo a utilizar una vez alcanzado el mayor grado de limpieza posible en los condensadores, se realizaron 3 pruebas en el laboratorio.

Para estas pruebas, se prepararon soluciones de agua suave con el producto químico y se le añadieron trozos de incrustaciones, previamente pesados. Se dejaron por varios días y luego se observó la solución. Posteriormente, se pesaron las incrustaciones presentes para conocer el efecto del producto sobre la misma. Se experimentó con dos productos de distintas empresas: el producto AT de la empresa W, y el producto C de la empresa E.

En la figura N°32 se presentan los resultados obtenidos en las pruebas de los productos químicos a utilizar como tratamiento preventivo contra las incrustaciones.

Como se puede observar en la figura anterior, de los productos probados, el AT y la mezcla de C+AT son los que arrojaron mejores resultados. En ambos casos, el porcentaje de efectividad promedio está cerca del 3%, por lo que si se utiliza cualquiera de las dos posibilidades se obtendrían los mismos resultados. Debido a que en el segundo caso se utilizan dos productos (C y AT) para el tratamiento preventivo, la inversión

es mayor, por lo que es preferible realizar el tratamiento preventivo de los condensadores con el producto AT.

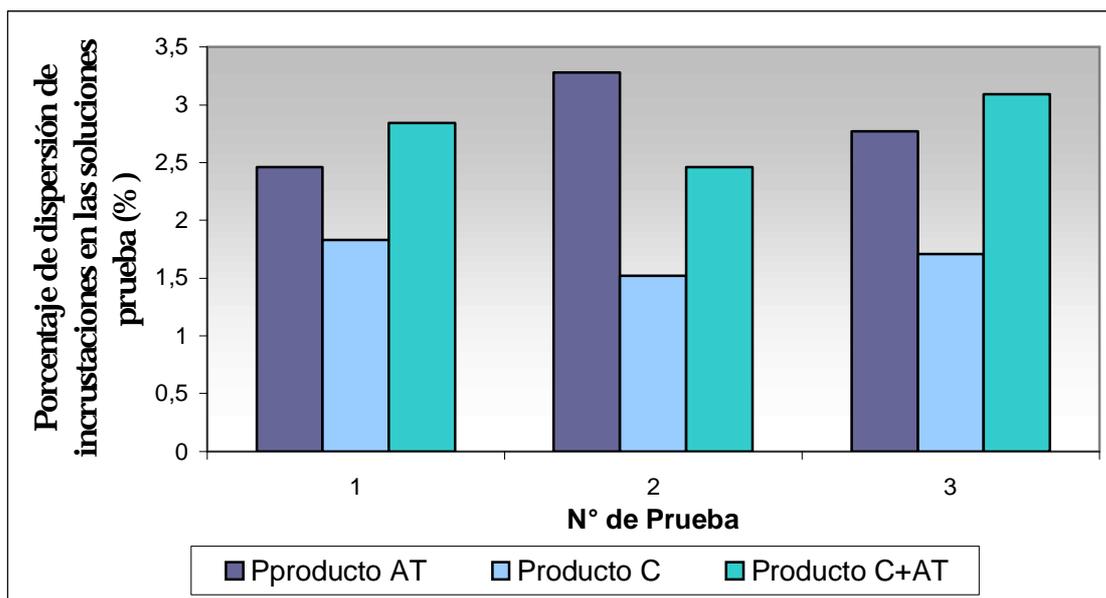


Figura N°32: Resultados de las pruebas con Tratamientos Químicos Preventivos para las incrustaciones.

Cabe destacar, que en ambos casos se presentaron restos de incrustaciones suspendidas, y que los pH en todas las pruebas aumentaron, alrededor del 20%, verificando la disolución de sólidos en la solución preparada.

VI.10. Evaluación para la instalación de un sistema dosificador automático de productos químicos para el tratamiento preventivo de incrustaciones y corrosión.

Una vez decididos los productos que se aplicarían para el tratamiento preventivo se estudió el sistema de flujo necesario, considerando la utilización de una bomba de dosificación de producto

químico. La dosificación de productos químicos se realizó para los dos condensadores evaporativos y de manera simultánea, tanto con inhibidor de incrustaciones como de corrosión.

Para alimentar los dos productos químicos a los condensadores, fue necesario instalar dos bombas dosificadoras continuas. Como se puede ver en la figura N°33, las bombas fueron ubicadas en los lados de los condensadores, cada una con una capacidad de 0.21 GPH, operando a una presión máxima de 150 psig. El diámetro de la tubería de la solución es de 0.25 plg. Estas bombas tienen una perilla que permite regular el caudal partiendo de diferentes frecuencias de dosificación.

| | | | | | | | |
|---------------|----------------------------------|--|----------------------------|---|----------------------------|----------------------------------|---------------|
| Bomba K - 201 | Condensador Evaporativo CE - 201 | Tambor de Inhibidor de Corrosión T - 201 | Bomba Dosificadora K - 203 | Tambor de Inhibidor de Incrustaciones T - 202 | Bomba Dosificadora K - 204 | Condensador Evaporativo CE - 202 | Bomba K - 202 |
|---------------|----------------------------------|--|----------------------------|---|----------------------------|----------------------------------|---------------|

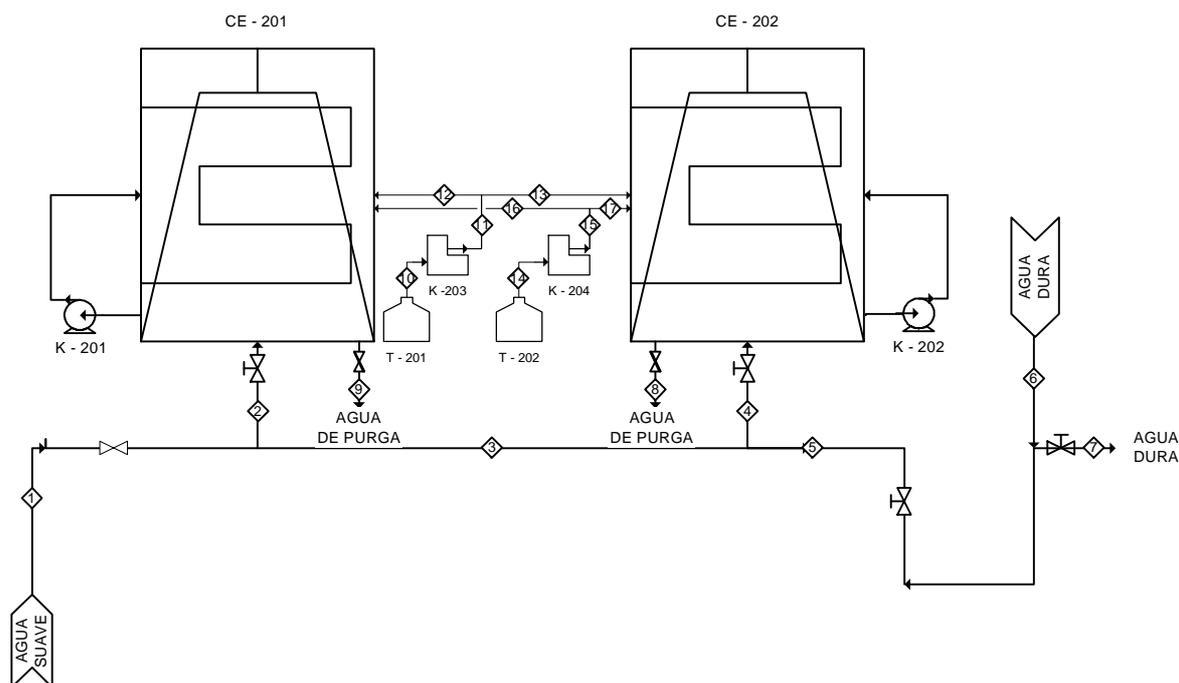


Figura N°33: Diagrama de Flujo del Sistema dosificador automático de productos químicos a los Condensadores Evaporativos de Planta Nueva.

VI.11. Implementación de Análisis de aguas como rutina en la empresa.

Una vez establecidos los sistemas de dosificación de producto, se procedió a establecer una serie de análisis para las aguas de los condensadores. Estos controles van a ser llevados por el supervisor del departamento de Aguas Industriales.

En una primera fase se comenzaron a realizar los días lunes, miércoles y viernes, por 1 mes; una vez que se establecieron los caudales promedios de alimentación, se procedió a realizar los análisis una vez por semana, y así se continuarán haciendo, con la finalidad de controlar y mantener el nivel de incrustaciones presentes.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Una vez culminado los distintos tratamientos y estudios en el sistema se pudo concluir:

- ✚ Inicialmente la capacidad de los condensadores evaporativos estaba en un 50%, respecto a la evaporación del agua en el sistema.
- ✚ El nivel de incrustaciones es aproximadamente igual entre ambos condensadores evaporativos.
- ✚ En horas de la tarde los condensadores evaporan aproximadamente un 25% más de agua, respecto las horas de la mañana.
- ✚ Se descartó para el tratamiento químico, el producto AF por la poca emulsión durante la prueba realizada.
- ✚ A mayor espesor de incrustaciones es necesario emplear mayor cantidad de producto químico y tiempo de tratamiento.
- ✚ Además de disolver los sólidos de las incrustaciones, los productos químicos ocasionan desprendimiento de partículas visibles, suspendiéndolas en el agua.
- ✚ Es difícil conseguir un producto químico que elimine los compuestos de sílice en los condensadores.

- ✚ Mientras el producto químico desincrustante cuente con un contenido de ácidos fuertes en mayor concentración, su efecto sobre las incrustaciones es mayor.
- ✚ El aumento de pH en la solución desincrustante, indica la disolución de sólidos incrustantes de los tubos.
- ✚ De los cuatro productos analizados por los diferentes proveedores, el producto AS es el que mostraba mejor efectividad de acuerdo con las pruebas efectuadas.
- ✚ El tratamiento químico desincrustante aplicado sobre las incrustaciones tuvo un efecto despreciable debido al espesor de las incrustaciones y al tiempo que tienen las mismas allí alojadas.
- ✚ El agua ejerce un efecto desincrustante sobre las incrustaciones, siendo esto un proceso muy lento.
- ✚ El uso de dispersantes de lodos con agua suave aumenta la liberación de sólidos en un 300% respecto a utilizar agua suave únicamente.
- ✚ El tratamiento mecánico es más efectivo que el tratamiento químico desincrustante, pudiendo aumentar del 50% al 70%, aproximadamente, el proceso de vaporización del agua.
- ✚ Para alimentar agua suave a los condensadores evaporativos no es necesario adquirir un suavizador nuevo.

- ✚ Un sistema de condensadores evaporativos puede mantenerse con un mínimo de incrustaciones, alimentándose agua suave, dispersante e inhibidor de corrosión de manera automática.
- ✚ Para el mantenimiento de los condensadores evaporativos, en cuanto al control de incrustaciones se empleará el producto AT y el inhibidor de corrosión correspondiente.
- ✚ El sistema de dosificación de producto químico utilizado es continuo y automático.

Adicionalmente a los mejoramientos realizados en el sistema de condensadores evaporativos, se propone una serie de recomendaciones con la finalidad de mantener y evitar un nuevo deterioro de los mismos por la formación de incrustaciones:

- ✚ En la medida de lo posible, instalar el sistema de alimentación a los condensadores evaporativos como una mezcla de agua suave y agua dura.
- ✚ Mientras el sistema propuesto anteriormente no sea instalado, se recomienda seguir alimentando agua suave a los condensadores.
- ✚ En el momento de llenar alguna de las calderas de Planta Nueva o de realizar la regeneración del suavizador, es necesario cerrar el paso de agua suave a los condensadores y abrir el de agua dura, a fin de evitar una alta disminución en el nivel de agua en la piscina de los mismos, pudiendo ocasionar inconveniente con el sistema.

- ✚ Como estudios posteriores con tratamientos desincrustantes, se recomienda realizar pruebas a nivel de laboratorio empleando Soda cáustica en solución y colocándole un trozo de incrustación.
- ✚ Se recomienda mantener una alimentación constante de los productos químicos del tratamiento preventivo a fin de cuidar a los tubos de las incrustaciones y la corrosión.
- ✚ Antes de realizar cualquier tipo de tratamiento en un equipo, es preferible hacer una prueba pequeña escala, tratando de simular lo más posible el sistema a tratar.
- ✚ En caso de que el operador tenga que entrar en contacto con el aire que sale del condensador por la parte superior, es necesario que éste utilice mascarilla, debido a que dentro del condensador se forma una bacteria peligrosa, que puede ocasionar grandes inconvenientes una vez que se aloja en el sistema respiratorio del mismo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ✚ CONAN, Jean-Georges. (1990). “Refrigeración Industrial”. Editorial Paraninfo.
- ✚ DEUTSCHER, Normenausschuss. (1968). “Ensayos de rendimiento en torres de refrigeración”. Editorial Balzola. Bilbao, España.
- ✚ DOSSAT, Roy J. (1998). “Principios de Refrigeración”. Compañía Editorial Continental, México.
- ✚ FAIRES, Virgil M. (1973). “Termodinámica”. 2da Edición. Editorial Hispanoamericana, España.
- ✚ KERN, Donald Q. (1991). “Procesos de transferencia de calor”. Compañía Editorial Continental S.A. México.
- ✚ LIPESA. (1998). “Tratamiento Químico del Agua”. Editorial Impregraf, Caracas, Venezuela.
- ✚ MARSH, Warren. (1990). “Principios de Refrigeración”.
- ✚ MANRIQUE, José A. (1995). “Termodinámica”. 2ª Edición. Harla. México.
- ✚ PERRY, Robert. (1973). “Chemical engineers’ handbook”. 6ta Edición. McGraw-Hill, Japón.
- ✚ QUIJADA M., Jesús R. (2004). “Evaluación de formulaciones basadas en TPA (Aspartato térmicamente polarizado) como inhibidor de corrosión e

incrustaciones, en sistemas de enfriamiento recirculantes abiertos usando

el sistema Piloto LIPESA”. TEG presentado ante la ilustre Universidad Central de Venezuela para optar al título de Ingeniero Químico. Caracas.

✚ QUIJADA, Maria Nelly. (2000). “Estudio de la eficiencia y rendimiento del Biodispersante Ecológico en los condensadores evaporativos de INACOR”. Pasantía realizada en la Industria Alimenticia Corralito. Carrizal.

✚ SEARS, Francis W. (1958). “Mecánica, movimiento ondulatorio y calor”. Editorial Andinson and Wesley. USA.

✚ “Standard Methods for the Examination of Water and Watewater”. 16th Edition.

✚ STOECKER, W. F. (1978). “Refrigeración y Acondicionamiento de aire”. Libros McGraw-Hill. México.

✚ TREYBAL, Robert. (2001). “Operaciones de Transferencia de Masa”. 2^a Edición. McGraw – Hill. México.

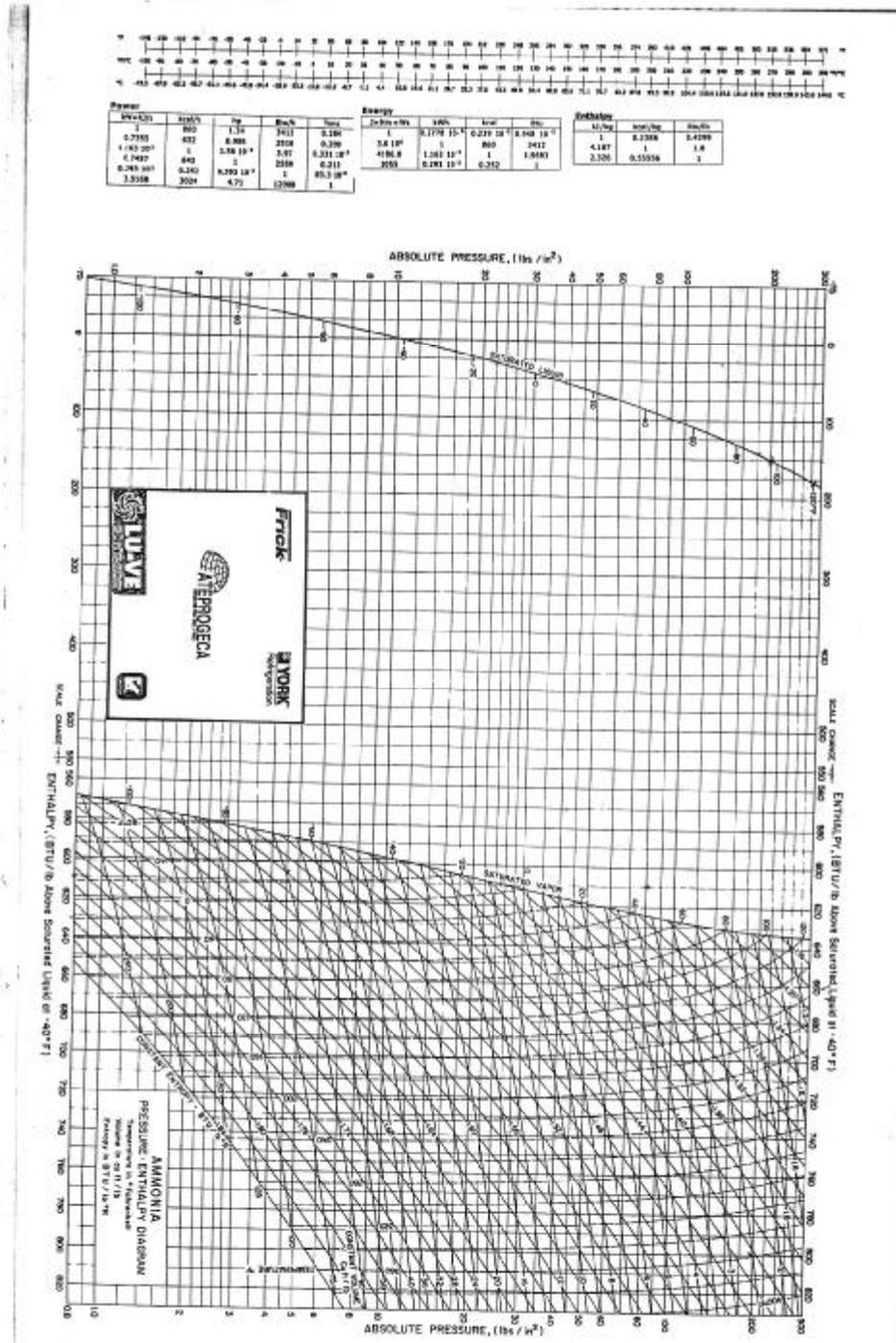
✚ VIAN, Angel. (1967). “Elementos de Ingeniería Química”. 5ta Edición. Ediciones Aguilar, Madrid, España.

✚ ZULOAGA M., Oscar. (1939). “Tratamiento de las aguas para uso en las calderas de vapor y su control”. Tesis presentada ante la ilustre Universidad Central de Venezuela para optar al título de Bachiller en Filosofía. Caracas.

✚ www.redquímica.unam.mx

APÉNDICE A

Diagrama Presión-entalpía (P-h) del amoníaco



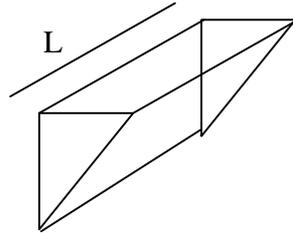
APÉNDICE B

Metodología para la determinación de la cantidad de agua evaporada por los Condensadores Evaporativos

Para determinar la cantidad de agua evaporada se realiza el siguiente procedimiento experimental,

1. Cerrar la válvula de purga y esperar 5 min. que se estabilice el nivel de la piscina del condensador.
2. En el medidor de nivel del condensador se marca la altura que tiene la piscina, y se establece una diferencia marcando en dicho medidor la altura correspondiente a la diferencia dispuesta. La altura final va a ser menor que la inicial.
3. Una vez que se cuente con las dos alturas marcadas, se procede a cerrar la válvula del agua de reposición a la vez que se comience a medir el tiempo en que tarda el condensador en evaporar el agua que se encuentra entre dichas alturas.
4. Mientras transcurre el tiempo se miden las temperaturas de bulbo húmedo y bulbo seco de la entrada y la salida del condensador.
5. Después de alcanzar la altura final establecida, se detiene el cronómetro y se abren las válvulas.
6. Luego se realiza el mismo procedimiento con el otro condensador.
7. Con los datos obtenidos durante la medición se realizan los cálculos, para determinar el caudal de agua evaporada, que se muestran a continuación:

Si se tiene que el volumen de la piscina del condensador presenta la siguiente forma,



Partiendo de ecuaciones de volumen, caudal y valores promedios, se realizaron las deducciones pertinentes llegando a que para determinar el caudal de agua evaporada se emplea la siguiente ecuación:

$$h_{\text{med}} = \frac{l_1 + l_2}{2} \quad (19)$$

donde h_{med} : altura media (m)

l_1 : altura inicial del condensador (m)

l_2 : altura final del condensador (m)

$$h_{\text{med}} = \frac{0.435 \text{ m} + 0.385 \text{ m}}{2} = 0.41 \text{ m}$$

$$\Delta h = l_2 - l_1 \quad (20)$$

$$\Delta h = 0.435 - 0.385 = 0.05 \text{ m}$$

donde Δh : diferencia de alturas (m)

El tiempo empleado por el condensador para llegar de la altura inicial a la final fue de $t_{\text{evap}} = 15.28$ min y el largo de la piscina es de $L = 3.54$ m, por lo que el caudal de agua evaporada es,

$$W_{\text{evap}} = \frac{L * \Delta h * h_{\text{med}}}{t_{\text{evap}}} \quad (21)$$

Donde

W_{evap} : Caudal volumétrico de agua evaporada (l/h)

L: Largo de la piscina del condensador (m)

t_{evap} : Tiempo en que se evapora el agua (h)

$$W_{\text{evap}} = \frac{3.54 * 0.05 * 0.41 * 1000}{15.28/60} = 285 \text{ lt/h}$$

APÉNDICE C

Metodología para la determinación de las purgas continuas o periódicas a realizar en los Condensadores Evaporativos

Para la determinación del caudal de purga a implantar en los condensadores es necesario saber la cantidad de sólidos disueltos presentes en una muestra de agua de la piscina y del agua que se está recirculando dentro del condensador. Adicionalmente, es imprescindible determinar el caudal de agua evaporada.

Una vez conocidos estos valores se aplica la ecuación correspondiente dependiendo del caso que se presente.

En la deducción de las ecuaciones se realizó un balance de masa tomando en cuenta la variación de los sólidos dentro del condensador, quedando que,

$$W_{\text{purga}} = W_{\text{evap}} * \frac{(X_{\text{rep}} + X_{\text{pis}})}{(X_{\text{rep}} - X_{\text{pis}})} - \frac{dS/dt}{(X_{\text{rep}} - X_{\text{pis}})} \quad (22)$$

Donde

W_{purga} : Caudal de agua de Purga (l/h)

S : Cantidad de sólidos disueltos en el agua (ppm como STD)

X_{rep} : Concentración en sólidos disueltos del agua de reposición (ppm como STD)

X_{pis} : Concentración en sólidos disueltos del agua de la piscina (ppm como STD)

A partir de esta ecuación se pueden estudiar 3 casos:

Caso 1: Cuando el condensador no tiene caudal de purga, es decir, $W_{purga} = 0$,

$$dS/dt = W_{evap} * (X_{pis} + X_{rep}) \quad (23)$$

Caso 2: Cuando la variación de los sólidos disueltos en la piscina o dentro del condensador es cero, o lo que es lo mismo, la cantidad de sólidos es constante. Cabe mencionar, que este es el caso que se desea que ocurra en el condensador, por lo que esta será la ecuación a utilizar para el cálculo de caudal de purgas en los condensadores.

Si $dS/dt = 0$, se obtiene que

$$W_{purga} = W_{evap} * \frac{(X_{rep} + X_{pis})}{(X_{rep} - X_{pis})} \quad (24)$$

Caso 3: Cuando el caudal de purga y de agua evaporada es igual, o sea, $W_{purga} = W_{evap}$.

$$dS/dt = 2 * W_{evap} * X_{rep} \quad (25)$$

Dentro del caso 3 se puede presentar que las relaciones entre el caudal de purga y de agua evaporada sea diferente de 1, por lo que en estos casos se puede aplicar la siguiente ecuación:

$$dS/dt = W_{evap} * ((1-n)*X_{pis} + (1+n)*X_{rep}) \quad (26)$$

donde n: el valor de la relación entre el caudal de purga y de agua evaporada, o lo que es lo mismo, $W_{purga} / W_{evap} = n$.

Como se dijo anteriormente, en la mayoría de los casos se aplicará la ecuación (24), ya que es la manera de mantener una cantidad de sólidos cercana al valor deseado, a fin de disminuir las incrustaciones, el ensuciamiento y la corrosión.