



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS DE UNA PLANTA
DESALADORA DE EME CON UN
ESTANQUE SOLAR COMO
FUENTE DE ENERGÍA**

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE:
INGENIERO MECÁNICO

PRESENTA:

ARMANDO ÁLVAREZ RAMÍREZ

DIRECTOR DE TESIS:
M.I. FELIPE MUÑOZ GUTIÉRREZ



Ciudad Universitaria, México D. F., Febrero de 2010.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Dedicatorias y agradecimientos

A Dios; por haberme dado la dicha de conocer esto que llamamos vida y permitirme ser parte de una familia maravillosa "Álvarez Ramírez".

A mis padres; las personas que más amo en la vida, gracias por el cariño, las enseñanzas, la paciencia y el apoyo moral y económico que siempre me han brindado el cual es invaluable para mí. Gracias por estar a mi lado en los buenos momentos de mi vida, pero sobre todo, por ayudarme a superar los malos. Hago este pequeño logro compartido esperando que tengan claro que mis ideales y esfuerzos son inspirados en cada uno de ustedes.

A mi madre; quien ha llenado de significado todo mí existir, con su intachable expresión de amor, siempre incondicional, que jamás olvidaré. Al ser humano que admiro y respeto profundamente.

A mi padre; quien me ha acompañado durante mi vida, siendo una presencia importante que me alienta a la superación. Al ser que inculcó en mí diversos valores y principios, dejando así una huella marcada en mi personalidad.

A mi hermana; por haber contribuido en gran medida en mi formación como persona brindándome su apoyo y consejos, por haberme demostrado su cariño en el transcurso de mi vida.

A mis sobrinas, por motivarme a esforzarme al máximo para llegar a ser un ejemplo en su formación y que se sientan orgullosas de mis logros y valores.

A Tadia, quien ha llegado a ser una persona muy especial en mi día a día, y con quien deseo compartir el resto de mi vida.

A todos los amigos que hice durante mi vida académica, con quienes compartí buenos momentos y que aún siguen formando parte de mi vida al brindarme lo mejor de ellos: su amistad.

Al Ingeniero Felipe Muñoz; por la paciencia y el apoyo en la elaboración de este trabajo de tesis, por compartir sus consejos y experiencia, por enseñarme a buscar la excelencia en el trabajo y por ser una gran persona y amigo.

A los profesores; por sus enseñanzas tanto en la vida profesional como personal.

A la UNAM; quien fue mi segunda casa durante varios años, me abrió las puertas y me dio las herramientas necesarias para un buen desarrollo profesional y personal, especialmente a la Escuela Nacional Preparatoria "Justo Sierra" y a la Facultad de Ingeniería.

Y finalmente a todas aquellas personas que he conocido a lo largo de mi vida, pues gracias a ellas soy quien soy, me han dejado muchas enseñanzas buenas y malas, y gracias a todas esas enseñanzas y a esas personas... soy Armando.

ÍNDICE

	Página
RESUMEN	1
INTRODUCCIÓN	2
CAPÍTULO 1. PRINCIPIOS DE RADIACIÓN SOLAR	4
1.1. Introducción	4
1.2. Definición de radiación solar	4
1.3. Leyes de radiación	4
1.4. Procesos de atenuación de la radiación solar	5
1.4.1. Dispersión	5
1.4.2. Reflexión	6
1.4.3. Absorción por moléculas de gases y partículas en suspensión	7
1.5. Clasificación de la radiación	8
1.5.1. Radiación directa	9
1.5.2. Radiación difusa	9
1.5.3. Radiación global	10
1.6. Constante solar	11
1.7. Instrumentos de medición	13
1.7.1. Piranómetro	13
1.7.2. Pirheliómetro	14
1.7.3. Actinógrafo	15
1.7.4. Heliógrafo	15
Nomenclatura capítulo 1	17
CAPÍTULO 2. DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN DE UN ESTANQUE SOLAR	18
2.1. Introducción	18
2.2. Estanque solar	18

2.3. Funcionamiento de un estanque solar	19
2.4. Ventajas y desventajas de un estanque solar	20
2.5. Restricciones de un estanque solar	21
2.6. Aplicaciones	22
2.6.1. Desalación de agua	22
2.7. Construcción de un estanque solar	22
2.8. Modelo matemático	23
2.8.1. Solución analítica	25
2.8.2. Solución numérica	26
2.8.3 Extracción de energía	26
Nomenclatura capítulo 2	29
CAPÍTULO 3. PRINCIPIOS DEL PROCESO DESALADOR DE EME	30
3.1. Introducción	30
3.2. Evaporadores de múltiple efecto	30
3.3. Métodos de alimentación	32
3.4. Capacidad y economía de los evaporadores de múltiple efecto	34
3.5. Efecto de la carga de líquido y de la elevación del punto de ebullición	35
3.6. Número óptimo de efectos	36
Nomenclatura capítulo 3	37
CAPÍTULO 4. BALANCES DE MASA Y ENERGÍA EN EL PROCESO DE EME	38
4.1. Introducción	38
4.2. Modelado del proceso de EME	38
4.3. Perfiles de temperatura	40
4.4. Perfiles de concentración de sal, caudal de salmuera y destilado	41
4.5. Área de transferencia de calor	43
4.6. Criterio de convergencia y arreglo para una nueva iteración	43

4.7. Parámetros de rendimiento	44
4.8. Balance de masa y energía numéricos	45
4.8.1. Análisis del condensador	50
Nomenclatura capítulo 4	51
CAPÍTULO 5. DINÁMICA OPERATIVA DE LOS PROCESOS	53
5.1. Introducción	53
5.2. Cálculo de carga térmica	53
5.3. Área teórica de captación del estanque solar	54
5.4. Evaporación	54
5.5. Salmuera concentrada	55
5.6. Cuidados especiales	55
5.7. Tabla de resultados	56
Nomenclatura capítulo 5	57
CAPÍTULO 6. ACOPLAMIENTO DE LOS PROCESOS	58
6.1. Introducción	58
6.2. Estanque solar	58
6.3. Evaporador	59
6.4. Planta de evaporación de EME	60
6.5. Condensador	60
6.6. Calentador líquido-líquido	60
6.7. Análisis numérico del acoplamiento de los procesos	61
6.7.1 Análisis del evaporador de pileta	62
6.7.1.1 Cálculo del área de transferencia de calor del evaporador	64
6.7.2 Análisis del proceso de EME	66
6.7.3 Análisis del condensar externo	72
6.8 Tablas de resultados	73

Nomenclatura capítulo 6	74
CAPÍTULO 7. ANÁLISIS ECONÓMICO PRELIMINAR	76
7.1. Introducción	76
7.2. Cálculo de costo por metro cuadrado	76
7.3. Costo del estanque con operación y mantenimiento	76
7.4. Cálculo del costo de producción de agua dulce	77
7.5. Tabla de resultados	78
Nomenclatura capítulo 7	79
CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	80
REFERENCIAS	82

RESUMEN

La aportación de esta tesis ha sido desarrollar una planta para desalar agua de mar, mediante un proceso de desalación de evaporación de múltiple efecto (EME) de 4 efectos tomando como fuente de energía agua caliente extraída de un estanque solar con un área de captación de 568, 621 [m²] y un volumen total de 1, 705, 865 [m³]. Para dicho estanque solar se requiere reponer 37, 529 [m³/año] de salmuera diluida en la zona inferior y 1, 421, 554 [m³/año] de salmuera diluida en la zona superior. Todos los datos son para una instalación operando en La Paz, BCS.

Se analiza la operación del proceso desalador de EME, en donde se detallaron diversos rubros tales como funcionamiento, los métodos de alimentación, capacidad y economía de los evaporadores de múltiple efecto, los balances de masa y energía, número óptimo de efectos del proceso, etc. De acuerdo con la dinámica de operación del estanque y del proceso desalador se estableció el acoplamiento de los procesos.

El arreglo estudiado estima un costo de producción de agua dulce de 33 [\$/m³], comparado con 9 y 6 [\$/m³] para plantas de Evaporación Instantánea de Múltiple Efecto (EIME) y Osmosis Inversa (OI) tradicionales.

INTRODUCCIÓN

El agua potable es un recurso vital para el ser humano y es un factor indispensable para el desarrollo industrial y el crecimiento de la población. Esto implica a su vez la generación de más productos y servicios que en su mayoría requieren la utilización de agua en sus procesos y demanda una infraestructura para ésta desde su obtención, tratamiento, transporte y distribución.

Uno de los principales problemas a los que se enfrenta actualmente la humanidad es la escasez de agua potable, problema que nuestro país también enfrenta, toda vez que un considerable porcentaje de su población carece de agua potable.

Adicionalmente, en 1950 la población de México era de 25 millones de habitantes, población que se incremento a 103 millones en el año 2005, es decir, la población se ha cuadruplicado en un periodo poco mayor a 50 años.

La posibilidad de transformar en agua potable el agua salada ha sido un anhelo del ser humano desde tiempos inmemoriales. Ya desde la prehistoria, el hombre observaría que, en su ciclo natural, las grandes masas de agua, como los ríos, lagos y el propio mar se evaporaban formando nubes; asimismo, el hombre interpretaba que las nubes eran las responsables de la lluvia, y que éstas no contenían sales ni impurezas.

Desde tiempos muy lejanos, el hombre intentó imitar a la naturaleza reemplazando la energía solar por el fuego y propiciando, por tanto, el nacimiento de un primer e incipiente sistema de destilación. Esta utopía parece que empezó a tomar visos de realidad ya a mediados del siglo IV antes de Cristo, cuando Aristóteles fabricó el primer evaporador que se conoce.

En el siglo XVIII se dio una circunstancia que favoreció mucho el desarrollo de los evaporadores: el auge de la industria del azúcar, cuyo refinado necesitaba de evaporadores para abaratar el proceso. A mitad del siglo XIX no era infrecuente el hecho de que determinados barcos llevaran instalados destiladores para potabilizar agua de mar.

Tras la II Guerra Mundial comienzan ya a instalarse las primeras plantas desaladoras. Países como Arabia Saudí y Kuwait, enormemente deficitarios en el terreno hídrico, pero cercanos al mar, son los que abanderan este proceso.

Actualmente es Arabia Saudita, uno de los países pioneros en desalinización de agua de mar, el que lidera la producción en el mundo, calculándose que cuatro de cada cinco litros que se consumen en el país provienen de plantas desalinizadoras. Le siguen otras naciones de la zona, como Emiratos Árabes Unidos, Libia, Kuwait y Qatar. Otros países con una abundante producción de agua desalinizada son Estados Unidos y Japón. España se sitúa directamente detrás, habiendo registrado en los últimos años una notable progresión.

En los últimos cuarenta años, el costo del agua desalada ha sufrido una importante reducción, calculándose que un metro cúbico resulta hoy cuatro veces más barato que en 1965.

El problema del agua que ha enfrentado México en los últimos años puede sintetizarse en tres grandes rubros: *i)* la consistente distribución inequitativa del recurso debido a la lejanía entre su ubicación y la ubicación de los asentamientos humanos; *ii)* las condiciones de escasez por sobreexplotación de acuíferos, y *iii)* los altos niveles de contaminación, deterioro o modificación localizados en extensas áreas del territorio mexicano.

En el primer capítulo se describen los principios de la radiación solar, las leyes que la rigen, los diversos procesos de atenuación a los que se enfrenta, su clasificación, y algunos instrumentos de medición de la misma, etc.

En el capítulo dos, se da un panorama general del diseño, construcción y operación de un estanque solar, su funcionamiento, sus ventajas y desventajas, las restricciones que tiene, las diversas aplicaciones, etc.

Posteriormente, en el tercer capítulo se dan a conocer los principios del proceso desalador de EME, en donde se hace mención del funcionamiento de los evaporadores de múltiple efecto, los métodos de alimentación, la capacidad y economía de los evaporadores de múltiple efecto, y número óptimo de efectos en un proceso EME, etc.

Adicionalmente, en el capítulo cuatro, se llevan a cabo los balances de masa y energía del proceso de EME, en donde se presenta el modelo matemático simplificado, el cual proporciona una eficiente y simple herramienta para el diseño y evaluación del sistema. El modelo es resuelto a través de una simple secuencia de cálculos manuales. Las iteraciones no son exhaustivas y no requieren programación. Incluso, las hipótesis invocadas en el desarrollo del modelo no sacrifican procesos fundamentales, específicamente, misma área de transferencia de calor en todos los efectos.

En el capítulo 5, de acuerdo con la dinámica de operación del estanque y del proceso desalador se establece el acoplamiento de los procesos, en donde se calcula de forma numérica la carga térmica proporcionada por el estanque solar, la radiación solar incidente en ciertas regiones de la República Mexicana, el área teórica del estanque solar, la evaporación de agua en el estanque solar, así como la cantidad de salmuera o sal que debe ser repuesta en el mismo.

En el capítulo 6, se realiza el acoplamiento de los procesos de una planta desaladora que usa un estanque solar como fuente de energía; es decir se unen el estanque solar, un evaporador, una planta de evaporación de EME, un condensador externo y un calentador líquido-líquido, con el fin de obtener el funcionamiento en conjunto del proceso.

Adicionalmente, en el capítulo 7, se realiza un análisis económico preliminar que nos establezca el interés del arreglo estudiado, todo esto con el objetivo de saber si es viable económicamente hablando la realización del proceso en estudio.

Finalmente, en el capítulo 8, se lleva a cabo un razonamiento de los resultados obtenidos en el estudio realizado y se elaboran las respectivas conclusiones.

1

PRINCIPIOS DE RADIACIÓN SOLAR

1.1 INTRODUCCIÓN

En este primer capítulo se define de manera teórica la radiación solar con el fin de entender de mejor manera sus características, toda vez que dicha radiación solar será la energía que alimentará al estanque solar, el cual a su vez será la fuente de energía para el proceso de desalación EME.

1.2 DEFINICIÓN DE RADIACIÓN SOLAR

La radiación solar es la energía emitida por el Sol, que se propaga en todas las direcciones a través del espacio mediante ondas electromagnéticas de diferentes frecuencias (luz visible, infrarroja y ultravioleta). Esa energía es el motor que determina la dinámica de los procesos atmosféricos y el clima. La energía procedente del Sol es radiación electromagnética proporcionada por las reacciones del hidrógeno en el núcleo del Sol por fusión nuclear y emitida por la superficie solar.

La temperatura aproximada en la superficie del Sol es de 5,800 [K]. Con dicha temperatura el Sol irradia 1,367 [W/m²], en todas direcciones. El espectro de la radiación solar es similar al de un cuerpo negro con una temperatura de unos 5,800 [K]. La parte visible de onda corta del espectro electromagnético ocupa alrededor de la mitad de la radiación, la otra mitad está en su mayoría en el infrarrojo cercano, con algunas ondas electromagnéticas en la parte ultravioleta del espectro.

El Sol es la principal fuente de energía para todos los procesos que ocurren en el sistema tierra – atmósfera – océano. Más del 99.9 % de la energía que este sistema recibe proviene del Sol. La radiación solar al pasar por la atmósfera sufre un proceso de atenuación por la dispersión (debida a los aerosoles), la reflexión (por las nubes) y la absorción (por las moléculas de gases y por partículas en suspensión), por lo tanto, la radiación solar reflejada o absorbida por la superficie terrestre (océano o continente) es menor a la del exterior de la atmósfera. Esto depende de la longitud de onda de la energía transmitida y del tamaño y naturaleza de la sustancia que modifica la radiación. La superficie de la Tierra, suelos, océanos, y también la atmósfera, absorben energía solar y la vuelven a irradiar en forma de calor en todas direcciones, [IDEAM, 2001].

1.3 LEYES DE RADIACIÓN

Para entender mejor cómo es que la energía radiante del Sol interactúa con la atmósfera de la tierra y su superficie, se deben conocer las leyes básicas de radiación, que son las siguientes:

1. Todos los objetos con temperatura mayor a 0 [K] emiten energía radiante, por ejemplo: el Sol, la Tierra, la atmósfera, las personas, etc.
2. Los objetos con mayor temperatura radian más energía total por unidad de área que los objetos más fríos. Por ejemplo, el Sol con una temperatura media de 5,800 [K] en su superficie

emite aproximadamente $64,000,000 \text{ [W/m}^2\text{]}$, lo que equivale a 165,000 veces más energía que la emitida por la Tierra (la cual emite cerca de $390 \text{ [W/m}^2\text{]}$) con una temperatura media en superficie de $288 \text{ [K]} = 15 \text{ [}^\circ\text{C]}$.

3. Los cuerpos con mayor temperatura emiten un máximo de radiación en longitudes de ondas (λ), más cortas. Por ejemplo, el máximo de energía radiante del Sol se produce en una λ cercana a $0.5 \text{ [}\mu\text{m]}$, mientras que para la Tierra en una λ cercana a $10 \text{ [}\mu\text{m]}$.

4. Los objetos que son buenos absorbedores de radiación son también buenos emisores. Este es un principio importante para comprender el calentamiento en la atmósfera, porque sus gases son absorbedores y emisores selectivos en longitud de onda. Así, la atmósfera es aproximadamente transparente (no absorbe) a ciertas longitudes de onda de radiación y aproximadamente opaca (buen absorbedor) en otras longitudes de onda, [IDEAM, 2001].

1.4 PROCESOS DE ATENUACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR

Los procesos de atenuación que sufre la radiación solar en su trayectoria hacia la tierra son los siguientes:

1.4.1 Dispersión

La radiación solar viaja en línea recta, pero los gases y partículas en la atmósfera pueden desviar esta energía, lo que se llama *dispersión*. La dispersión ocurre cuando un fotón afecta a un obstáculo sin ser absorbido cambiando solamente la dirección del recorrido de ese fotón. La dispersión depende de la longitud de onda, en el sentido de que cuanto más corta sea ésta, tanto mayor será la dispersión. Moléculas de gas con tamaños relativamente pequeños comparados con la longitud de onda causan que la radiación incidente se disperse en todas las direcciones, hacia adelante y hacia atrás; este fenómeno se conoce como dispersión de Rayleigh. Los aerosoles cuyos tamaños son comparables o exceden a las longitudes de onda de la radiación incidente, hacen que ésta no se disperse en todas las direcciones, sino mayormente hacia adelante, fenómeno llamado dispersión de Mie.

El proceso de la dispersión explica cómo es que una área con sombra o pieza sin luz solar está iluminada, le llega luz difusa o radiación difusa. Los gases de la atmósfera dispersan más efectivamente las longitudes de onda más cortas (violeta y azul), que las longitudes de onda más largas (naranja y rojo). Esto explica el color azul del cielo y los colores rojo y naranja del amanecer y atardecer. Salvo a la salida y a la puesta del Sol, todos los puntos del cielo son fuentes de difusión de luz azul para un observador ubicado en la superficie terrestre; al amanecer y en el crepúsculo, los rayos deben recorrer un camino más largo a través de la baja atmósfera; esto hace que casi toda la luz azul haya sido difundida antes de llegar al observador. Es por eso que la luz reflejada por las nubes o la difundida por las capas brumosas hacia el observador aparece rojiza.

Las aplicaciones prácticas de la energía solar comprenden únicamente la radiación solar directa de longitudes de onda entre 0.29 y $2.5 \text{ [}\mu\text{m]}$, la cual representa el 95.19% de la constante solar, es decir $1,301 \text{ [W/m}^2\text{]}$, [IDEAM, 2001].

1.4.2 Reflexión (Albedo)

La capacidad de reflexión o fracción de la radiación reflejada por la superficie de la tierra o cualquier otra superficie se denomina albedo. El albedo planetario es en promedio de un 30 %. Esta energía se pierde y no interviene en el calentamiento de la atmósfera.

El albedo, relación entre la radiación reflejada y la radiación incidente sobre una superficie horizontal, se expresa en porcentaje de la siguiente manera:

$$A \% = \frac{R}{H} (100) \quad (1.1)$$

Donde:

A % = albedo

R = flujo de radiación reflejada

H = flujo total incidente

El albedo es variable de un lugar a otro y de un instante a otro. Depende de diversos factores como son: la cobertura nubosa, la naturaleza de la superficie, la inclinación de los rayos solares, las partículas en el aire, etc. La Luna tiene sólo un 7 % de albedo, porque no tiene atmósfera, por consiguiente en las noches de luna llena da un buen brillo.

En la figura 1.1 se presenta el albedo medio para algunos meses del año obtenidos a partir del Experimento del Balance de Radiación de la Tierra (ERBE), elaborado por la NASA. Además se observa que las regiones oceánicas con poca nubosidad tienen albedos bajos, mientras que los desiertos tienen albedos con valores del orden de 30 % al 40 %. En las regiones tropicales la variación del albedo está influenciada por las perturbaciones del tiempo y la distribución de nubes asociadas. En las regiones polares, las variaciones estacionales del albedo están relacionadas con la distribución de las capas de hielo y el decrecimiento del ángulo de elevación solar con la latitud.

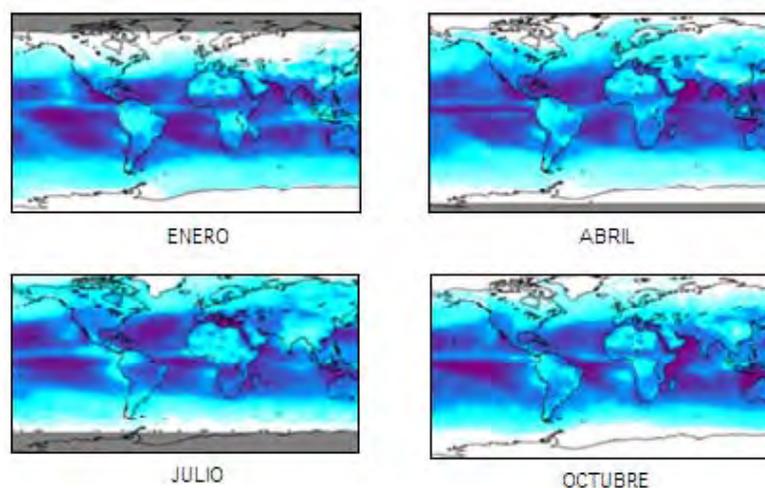


Figura 1.1. Albedo planetario medio mensual obtenido a partir del experimento del balance de radiación de la tierra (ERBE), elaborado por la NASA.

En general, las superficies oscuras y quebradas reflejan menor radiación que las claras y lisas. Al aumentar la humedad del suelo, este absorbe mayor cantidad de radiación global, lo que influye en el régimen térmico de las superficies regadas.

El albedo del suelo en general está comprendido entre un 10 al 30 %: el barro húmedo baja su valor hasta un 5 % y en el caso de arena seca, esta eleva su valor a un 40 %. El albedo de los sembradíos y bosques está entre 10 al 25 % y la nieve reciente alcanza un valor de 80 al 90 % (ver tabla 1.1).

El albedo del agua en promedio es menor que el del suelo. Esto se debe a que los rayos solares penetran en el agua más que en la tierra. En el albedo del agua influye el grado de turbiedad; en el agua sucia el albedo aumenta con respecto del agua limpia [IDEAM, 2001].

SUPERFICIE	ALBEDO %
Nieve fresca	80-85
Arena	20-30
Pasto	20-25
Bosque	5-10
Suelo seco	15-25
Agua (Sol cerca del horizonte)	50-80
Agua (Sol cerca del cenit)	3-5
Nube gruesa	70-80
Nube delgada	25-30
Tierra y atmósfera global	30

Tabla 1.1. Albedo de algunas superficies comunes [IDEAM, 2001].

1.4.3 Absorción por moléculas de gases y partículas en suspensión

La absorción de energía por un determinado gas tiene lugar cuando la frecuencia de la radiación electromagnética es similar a la frecuencia vibracional molecular del gas. Cuando un gas absorbe energía, esta se transforma en movimiento molecular interno que produce un aumento de temperatura.

La atmósfera es un fluido constituido por diferentes tipos de gases y cada uno de ellos se comporta de manera diferente, de manera tal, que absorben la energía selectivamente para diferentes longitudes de onda y en algunos casos son transparentes para ciertos rangos del espectro. La atmósfera principalmente tiene bajo poder de absorción o es transparente en la parte visible del espectro, pero tiene un significativo poder de absorción de radiación ultravioleta o radiación de onda corta procedente del Sol y el principal responsable de este fenómeno es el ozono. Asimismo, la atmósfera tiene buena capacidad para absorber la radiación infrarroja o de onda larga procedente de la Tierra y los responsables en este caso son el vapor de agua, el dióxido de carbono y otros gases traza como el metano y el óxido nitroso.

La absorción de radiación infrarroja procedente de la Tierra es importante en el balance energético de la atmósfera. Esta absorción por los gases traza calienta la atmósfera, estimulándolos a emitir radiación de onda más larga. Parte de esta radiación se envía al espacio, en niveles muy altos y otra parte se irradia nuevamente a la Tierra. El efecto neto de este fenómeno permite que la Tierra almacene más energía cerca de su superficie que la cantidad que podría almacenar si no tuviera atmósfera. Consecuentemente, la temperatura es más alta, del orden de 33 [°C]. Este proceso es conocido como el efecto de invernadero natural, sin este efecto la temperatura promedio en la superficie sería aproximadamente de 18 [°C] bajo cero y la vida en el planeta no sería posible.

Consecuentemente, los gases en la atmósfera que absorben la radiación infrarroja procedente de la Tierra o radiación saliente son conocidos como gases de efecto invernadero. Entre ellos se encuentran el dióxido de carbono, vapor de agua, óxido nitroso, metano y ozono. Todos los gases tienen moléculas cuya frecuencia vibracional se localiza en la parte infrarroja del espectro [IDEAM, 2001].

1.5 CLASIFICACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR

El efecto de atenuación de la radiación solar al atravesar la atmósfera se muestra en la figura 1.2. La radiación que finalmente llega a la superficie de la tierra se clasifica en radiación directa, difusa y global.

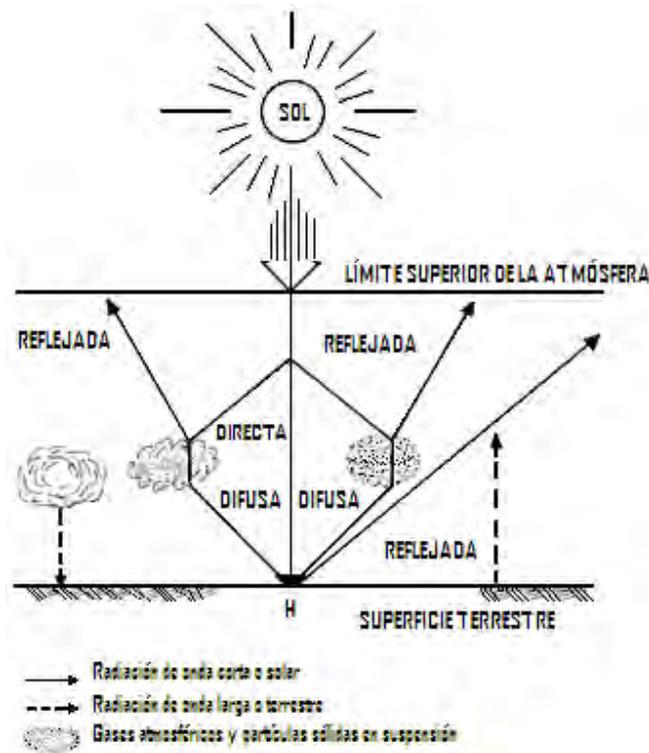


Figura 1.2. Atenuación de la radiación solar por la atmósfera terrestre.

1.5.1 Radiación directa (H_b)

La radiación directa es la radiación solar que llega a la superficie de la Tierra en forma de rayos provenientes del Sol sin haber sufrido difusión, ni reflexión alguna. Se puede calcular a partir de la siguiente ecuación:

$$H_b = I' = I \sen h \quad (1.2)$$

Donde I' es la componente vertical de la radiación solar directa y h la altura del Sol sobre el horizonte. Es evidente que I es mayor que I' y son iguales solamente cuando el Sol se encuentra en el cenit (figura 1.3) [IDEAM, 2001].

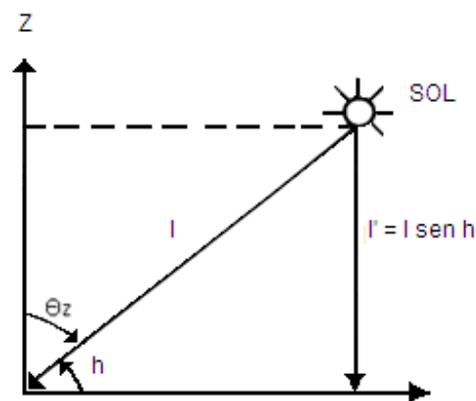


Figura 1. 3. Componente directa de la radiación solar.

Sobre la superficie de la tierra, el flujo de la radiación directa depende de los siguientes factores:

- Constante solar.
- Altura del Sol sobre el horizonte, (h).
- Transparencia atmosférica en presencia de gases absorbentes, nubes y niebla.

1.5.2 Radiación difusa (H_d)

La radiación difusa es la componente de la radiación solar que al encontrar pequeñas partículas en suspensión en la atmósfera en su camino hacia la tierra e interactuar con las nubes, es difundida en todas las direcciones; el flujo con el cual esta energía incide sobre una superficie horizontal por segundo es lo que llamamos radiación solar difusa. También es definida como la cantidad de energía solar que incide sobre una superficie horizontal desde todos los lugares de la atmósfera diferente de la radiación solar directa. Cuando no hay nubes en el cielo, la radiación difusa se produce por medio del proceso de difusión a través de partículas atmosféricas.

Sobre la superficie de la Tierra, la radiación difusa depende de:

- a) La altura del Sol sobre el horizonte. A mayor altura, mayor es el flujo de radiación difusa.
- b) Cantidad de partículas en la atmósfera. A mayor cantidad de partículas, mayor es la componente difusa; por consiguiente aumenta con la contaminación.
- c) Nubosidad. Aumenta con la presencia de capas de nubes blancas relativamente delgadas.
- d) Altura sobre el nivel del mar. Al aumentar la altura, el aporte de la radiación difusa es menor debido a que disminuye el espesor de las capas difusoras en la atmósfera, [IDEAM, 2001].

1.5.3 Radiación global (H)

La radiación global es toda la radiación que llega a la tierra que se mide sobre una superficie horizontal en un ángulo de 180°, resultado de la componente vertical de la radiación directa más la radiación difusa. El aporte de cada componente a la radiación global varía con la altura del Sol, la transparencia de la atmósfera y la nubosidad.

Su evaluación se efectúa por el flujo de esta energía por unidad de área y de tiempo sobre la superficie horizontal expuesta al Sol y sin ningún tipo de sombra; de esta manera, si llamamos H al flujo de radiación global, H_d al flujo de radiación difusa y H_b a la componente directa; se tiene que:

$$H = I \text{ sen } h + H_d = H_b + H_d \quad (1.3)$$

Recordando que I es la intensidad de la radiación directa sobre la superficie normal a los rayos solares, h la altura del Sol, e I' la componente vertical de la radiación directa sobre una superficie horizontal, entonces:

$$H = I' + H_d \quad (1.4)$$

Solamente el 47 % de la radiación solar que absorbe nuestra atmósfera llega a la superficie terrestre; 31 % directa y 16 % indirectamente, como radiación que se difunde en la atmósfera y se denomina, por ello, radiación difusa (figura 1.4).

Por otro lado, la radiación solar que se desaprovecha, la cual suma un total de 53 %, se divide en los siguientes porcentajes (tabla 1.2):

Proceso de atenuación	Porcentaje [%]
Se va al espacio exterior por reflexión	23
La absorben las capas de la atmósfera	17
Refleja en el suelo terrestre	7
Se pierde por difusión en aerosoles	6

Tabla 1.2. Procesos de atenuación de la radiación solar desaprovechada.

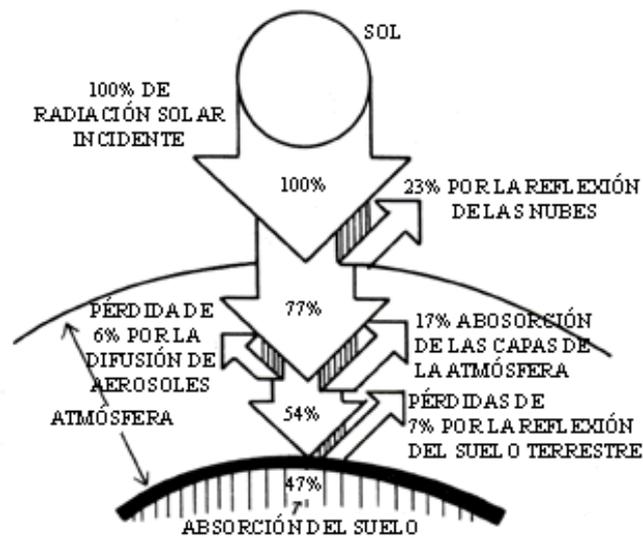


Figura 1.4. Balance energético de la radiación solar.

1.6 CONSTANTE SOLAR

En la parte superior de la atmósfera, a una distancia promedio de 150, 000, 000 [km] del Sol, el flujo de energía de onda corta interceptada por una superficie normal a la dirección del Sol en $[W/m^2]$ es llamada *constante solar*. Este valor da una idea de los valores que se registran en la parte superior de la atmósfera y de los valores que finalmente llegan a la superficie de la Tierra durante el día como consecuencia de las “pérdidas” de radiación por fenómenos (procesos de atenuación) como la reflexión, refracción y difracción durante su trayectoria.

Según el Centro de Referencia Radiométrica Mundial (World Radiometric Reference - WRR) del Centro Mundial de Radiación (World Radiation Center - WRC), la constante solar tiene un valor aproximado de $1,367 [W/m^2]$, con una desviación estándar de $1.6 [W/m^2]$.

La figura 1.5, muestra la constante solar medida por satélites en $[W/m^2]$ durante el período 1978-2003. En esta figura se observa que la constante varía con el tiempo, así como un leve aumento en los mínimos de la misma.

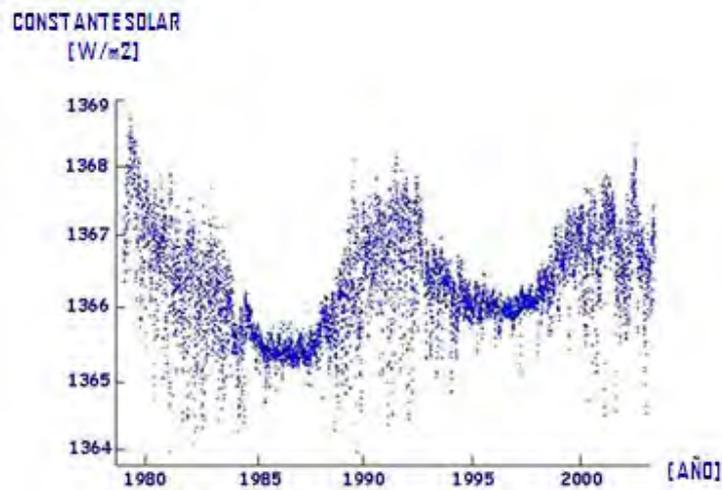


Figura 1.5. Valores de la constante solar medidos por medio de satélites. (Fuente: <http://www.gsfc.nasa.gov/topstory/2003/0313irradiance.html>)

Las variaciones de la constante solar dependen de la actividad solar asociada al número de manchas presentes en la superficie solar y a cambios en la distancia Tierra-Sol como consecuencia de la órbita elíptica terrestre. La intensidad de la energía solar varía inversamente proporcional al cuadrado de la distancia al Sol, entonces en el movimiento de translación de la Tierra cambia la distancia Tierra-Sol durante el año originando una variación de la radiación solar extraterrestre incidente sobre una superficie normal al rayo solar como ilustra la figura 1.5.

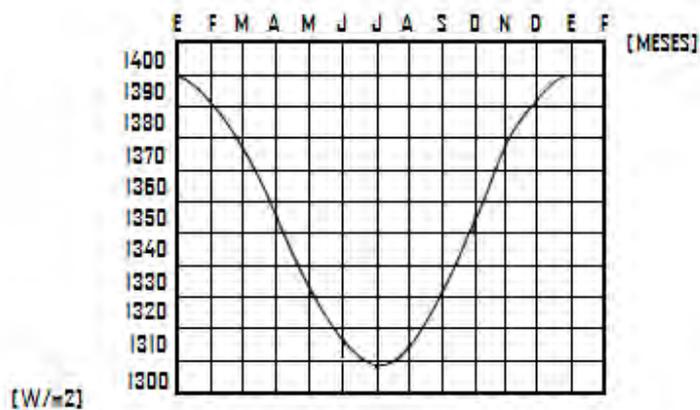


Figura 1.5. Variación de la radiación solar fuera de la atmósfera terrestre. (Fuente: IDEAM, 2001).

1.7 INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN (RADIACIÓN SOLAR)

La radiación solar se mide en forma directa utilizando instrumentos que reciben el nombre de radiómetros y en forma indirecta mediante modelos matemáticos de estimación que correlacionan la radiación con el brillo solar. Los radiómetros solares como los piranómetros o solarímetros y los pirheliómetros, según sus características, pueden servir para medir la radiación solar incidente global (directa más difusa), la directa (procedente del rayo solar), la difusa, la neta y el brillo solar. Los radiómetros se pueden clasificar según diversos criterios: el tipo de variable que se pretende medir, el campo de visión, la respuesta espectral, el empleo principal a que se destina, etc.

Tipo de instrumento	Parámetro de medida
Piranómetro	i) Radiación global ii) Radiación directa iii) Radiación difusa iv) Radiación solar reflejada. (Usado como patrón nacional)
Piranómetro espectral	Radiación global en intervalos espectrales de banda ancha
Pirheliómetro absoluto	Radiación directa (usado como patrón nacional)
Pirheliómetro de incidencia normal	Radiación directa (usado como patrón secundario)
Pirheliómetro (con filtros)	Radiación directa en bandas espectrales anchas
Actinógrafo	Radiación global
Pirgeómetro	Radiación difusa
Radiómetro neto o piranómetro diferencial	Radiación neta

Tabla 1.3. Instrumentos de medición de radiación solar.

A continuación se describen algunos de los instrumentos de medición mencionados en la tabla 1.3.

1.7.1 Piranómetro

El piranómetro es el instrumento más usado en la medición de la radiación solar (figura 1.6). Mide la radiación semiesférica directa y difusa que se mide sobre una superficie horizontal en un ángulo de 180°, obtenida a través de la diferencia de calentamiento de dos sectores pintados alternativamente de blanco y negro en un pequeño disco plano. Cuando el aparato es expuesto a la radiación solar, los sectores negros se vuelven más cálidos que los blancos. Esta diferencia de temperatura se puede detectar electrónicamente generándose un voltaje eléctrico proporcional a la radiación solar incidente. En la variación de la temperatura puede intervenir el viento, la lluvia y las pérdidas térmicas de la radiación al ambiente. Por lo tanto, el piranómetro tiene instalado una cúpula de vidrio óptico transparente que protege al detector, permite la transmisión isotrópica del componente solar y sirve para filtrar la radiación entre las longitudes de onda que oscilan aproximadamente entre 280 y 2,800 [µm].



Figura 1.6. Piranómetro.

1.7.2 Pirheliómetro

Los pirheliómetros son instrumentos usados para la medición de la radiación solar directa (figura 1.7). Esto se consigue colocando el sensor normalmente en el foco solar, bien manualmente o sobre un montaje ecuatorial. Este dispositivo consiste en una especie de telescopio con una orificio circular por la cual ingresa el rayo de sol, proyectándose en el otro extremo, donde se ubica el receptor, la imagen del disco solar más un anillo de cielo que rodea a este. Este dispositivo se mantiene enfocado al Sol mediante un seguidor solar. El desarrollo de estos dispositivos estuvo estimulado por la búsqueda de la constante solar. Desde mediados de 1960 se desarrolló una segunda generación de pirheliómetros absolutos, coincidente con los esfuerzos desarrollados para calcular la constante solar. Estos fueron construidos en Europa por la WRC de Suiza, en el Instituto Meteorológico de Bélgica y en USA por el Jet Propulsion Laboratory entre otros.



Figura 1.7. Pirheliómetro de cavidad absoluta, serie PMO-6.

1.7.3 Actinógrafo

El actinógrafo es un instrumento para registrar la radiación global que funciona mediante un sensor termomecánico, protegido por una cúpula de vidrio (figura 1.8). Está conformado por dos superficies bimetálicas, una pintada de color negro para que absorba las ondas electromagnéticas de la radiación solar y la otra de blanco para que las refleje y así ocasionar una diferencia de temperatura que permite formar curvatura en la placa negra que se amplifica por medio de palancas y se transmiten a un tambor movido por un mecanismo de reloj para describir una gráfica que registra los valores de radiación global.



Figura 1.8. Actinógrafo.

1.7.4 Heliógrafo

El heliógrafo es un instrumento registrador que proporciona las horas de Sol efectivo en el día (insolación o brillo solar) (figura 1.9). Registra los periodos de tiempo de radiación solar directa que superan un valor mínimo. Opera focalizando la radiación solar mediante una esfera de vidrio a manera de lente convergente, en una cinta con escala de horas, que, como resultado de la exposición a la radiación solar directa, se quema formando líneas, cuya longitud determina el número de horas de brillo del Sol.



Figura 1.9. Heliógrafo.

NOMENCLATURA CAPÍTULO 1

- Alfabeto convencional

A - (Albedo) [%]

h - (Ángulo entre la componente horizontal de la radiación solar directa y la superficie terrestre) [°]

I - (Componente horizontal de la radiación solar directa) [W/m²]

I' - (Componente vertical de la radiación solar directa) [W/m²]

R - (Flujo de radiación reflejada) [W/m²]

H_d - (Radiación difusa) [W/m²]

H - (Radiación global) [W/m²]

H_b - (Radiación directa) [W/m²]

- Símbolos griegos

Θ_z - (Ángulo entre la componente z y la componente horizontal de la radiación solar directa) [°]

2

DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN DE UN ESTANQUE SOLAR

2.1 INTRODUCCIÓN

Después de haber definido en el capítulo anterior los principios de la radiación solar, en el capítulo 2 se define de manera detallada las características importantes de un estanque solar y cómo es que éste aprovecha la radiación que incide, y realizando la conversión de energía aplicado al proceso desalador de EME.

2.2 ESTANQUE SOLAR

En el océano, la radiación solar se absorbe principalmente por las capas superiores de agua, quedando más frías las más profundas. Como ya se conoce, una ΔT grande no es posible; sin embargo, si consideramos un estanque poco profundo (1 ó 2 metros de profundidad) con un fondo negro, entonces, al penetrar la radiación solar, parte de ésta será absorbida en el fondo y su temperatura aumentará. Por el efecto de flotación, el agua más caliente se elevará a la superficie donde el calor será rápidamente disipado hacia la atmósfera; no obstante, si el agua del fondo por algún mecanismo pudiera hacerse más pesada que la superficial, entonces permanecería en el fondo y retendría el calor absorbido.

Dicho efecto ha podido observarse en forma natural en algunos lugares de la Tierra, en donde se ha encontrado que el agua contenía sal disuelta con una concentración que aumentaba con la profundidad. Este gradiente salino tiene el efecto de impedir la convección natural, de tal manera que el agua caliente permanece en el fondo del lago. Al respecto, donde por primera vez pudo observarse este fenómeno fue el lago Medve, localizado en Transilvania, Rumania, inclusive con referencias acerca de él, en la literatura desde 1902, dando temperaturas de hasta 70 [°C] a una profundidad de 1.32 [m]. Otro lago con este mismo fenómeno se encuentra en Israel, cerca de Elath, con temperaturas hasta 60 [°C] en el verano. En la Antártida, a una latitud de 70° sur, se midieron en el lago Vanda temperaturas de 25 [°C] a una profundidad de 60 [m], no obstante que la superficie está permanentemente cubierta por 3 ó 4 metros de hielo. Por otra parte en Venezuela, a una latitud de 12° norte, en la isla de los Roques se han registrado temperaturas de 45 [°C] a una profundidad de 1 [m]. Otros lagos naturales, en los que se han registrado fenómenos similares, son el lago Hot, localizado en Washington y el lago Mahega, en Uganda.

En México existen varios estanques solares naturales, entre los que se encuentran los de Guerrero Negro y Texcoco. En 1954, en Israel se empezó a experimentar con estanques solares artificiales para aprovechar el calor solar almacenado en el fondo y la experiencia israelí culminó en el año de 1979 con la construcción de la primera planta termoeléctrica que utiliza un estanque solar y tiene una potencia de 150 [kW], [Almanza y Muñoz, 2003].

2.3 FUNCIONAMIENTO DE UN ESTANQUE SOLAR

El funcionamiento de un estanque solar es en forma general el siguiente: un estanque solar es un cuerpo de agua sumergido en la tierra, dividido en tres regiones (figura 2.1). Su profundidad generalmente se encuentra en el intervalo de 1.5 a 3 metros.

- Zona convectiva superior (A).
- Zona de gradiente (B).
- Zona inferior (C).

La zona más profunda (C) es del orden de 1 metro de espesor y es una zona convectiva compuesta por una solución saturada, sirviendo además como almacén térmico. En la parte intermedia se localiza una zona no convectiva (B) que funciona como aislante térmico, con un gradiente salino de manera que su densidad aumenta con la profundidad; debido a este gradiente salino, se forma un gradiente térmico, y la temperatura aumenta con la profundidad; esta capa no convectiva puede variar de 1 a 1.5 metros de espesor, alcanzándose temperaturas cercanas a la ambiental en la zona próxima a la superficie del lago. La última zona (A), de algunos centímetros de espesor, está formada por agua salina con muy baja concentración; en esta capa existen convección y evaporación. Dicha zona se usa para mantener el gradiente salino de la zona no convectiva; además tiene que restituirse continuamente debido a la evaporación, ya que es necesario eliminar las sales que se difunden hacia esta zona para conservar el gradiente salino.

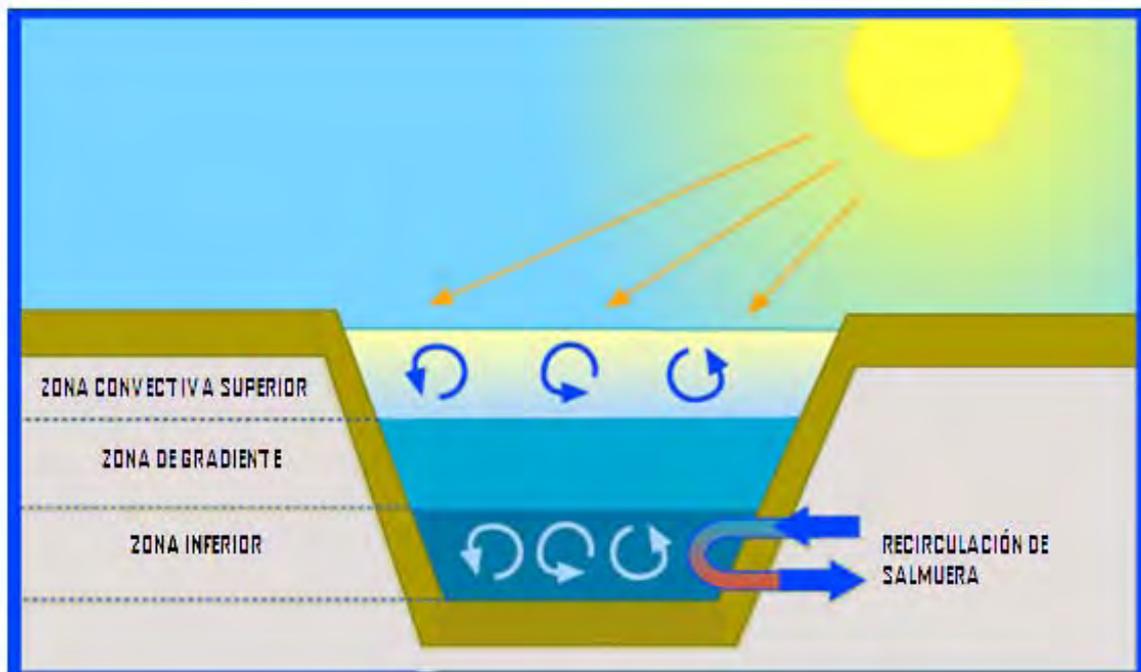


Figura 2.1. Diagrama de un estanque solar.

En los estanques solares se puede usar sal o salmuera natural. La sal seleccionada debe ser confiable a fin de manejarla y que no contamine el ambiente; los problemas relacionados con su disposición, toxicidad y contaminación de acuíferos subterráneos, se deben evaluar cuidadosamente. La sal debe ser barata, estar disponible en las cercanías y no reducir la transmitancia óptica del agua; su solubilidad debe ser fuertemente dependiente de la temperatura, y su difusividad lo más baja posible; por ejemplo, un estanque solar ideal podría ser un lago funcionando con una solución saturada (estanque solar saturado), un gradiente estable y sin difusión. Los cloruros de sodio y magnesio satisfacen las primeras condiciones. El KNO_3 y NH_4OH cumplen con el último criterio para un lago saturado, aunque son más costosas que el NaCl o MgCl_2 .

La versatilidad de los lagos solares se ilustra por su amplio intervalo de aplicaciones: pueden utilizarse en una pequeña comunidad como dispositivo solar pasivo para el cocinado de alimentos, calentamiento de agua para regaderas, e inclusive en algunas industrias rudimentarias; con la adición de bombas y tuberías es factible obtener calor para calefacción, o bien mediante bombas de calor, en combinación con estos estanques, se puede incrementar la temperatura para generar vapor y usarse a nivel industrial. Con sistemas de desalación (como las cámaras de evaporación) proporcionar agua potable o para irrigación de tierras.

Otro tipo de estanque solar que sí permite la conducción del calor por convección en todas las capas de agua u otro líquido se puede construir empleando un material que sea a la vez transparente y aislante para que no haya transferencia de calor a la superficie que está en contacto con el ambiente. Este sistema se utiliza en las albercas, para mantener el agua templada. Con frecuencia se emplea un plástico grueso con burbujas de aire que cubre completamente la superficie de la alberca.

2.4 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE UN ESTANQUE SOLAR

La utilización de estanques solares proporciona las siguientes ventajas sobre otros tipos de colectores solares:

1. La intermitencia de la radiación solar demanda una forma de almacén térmico. En un estanque solar este problema no existe, ya que su misma masa de agua sirve como almacén intrínseco, por lo que puede entregar una carga térmica tanto a lo largo del día como de la noche. Es el único dispositivo solar que no necesita un almacén adicional; además, en días nublados o de poca insolación, la gran masa de agua en la zona convectiva mantiene su temperatura por algunos días sin que surja preocupación por este tipo de fenómenos meteorológicos. Actualmente se realizan estudios por diferentes grupos para construir lagos solares con profundidades de más de 2 metros y de esta forma poder tener un almacén térmico con capacidad para funcionar tanto en verano como en invierno sin reducir prácticamente la carga térmica a lo largo del año.
2. Debido a la baja densidad de la energía de la radiación solar, la utilización de ésta es posible únicamente con áreas de captación muy grandes; el estanque solar en sí es una gran área de captación.

3. La acumulación de basura y de polvo en los vidrios o espejos de los colectores ordinarios o de enfoque, conduce a un mantenimiento frecuente. En el estanque solar no existe este problema.
4. El transporte de energía desde una gran área de captación, o hacia una zona central de utilización, es relativamente fácil si se usa el método de decantación. Es conocido que cuando existe un gradiente de densidad sobre un fluido, entonces es posible mover una capa horizontalmente sin causar perturbaciones en capas superiores o inferiores; de esta forma, es factible decantar la zona caliente del lago y transportar este calor al exterior o utilizar intercambiadores de calor en el fondo del lago.
5. El lago solar es simple en concepto y relativamente fácil de construir, teniendo además necesidad de una tecnología relativamente bien conocida en lo que respecta a materiales. Básicamente se necesitan técnicas ampliamente conocidas en ingeniería civil; se requiere contar con sal, agua y un sistema de bombeo para conducirla. Para impermeabilizar el lago existen materiales que se han probado ampliamente, como son plásticos, arcillas, concreto asfáltico, etcétera; su uso depende del tipo de suelo y de su accesibilidad. De esta manera es posible contar con una fuente barata de calor con temperaturas hasta de 90 [°C], de manera que la conversión termodinámica a electricidad u otra aplicación son de tomarse en cuenta para países en vías de desarrollo.

Los estanques solares abordan tres cuestiones ambientales derivadas del uso de combustibles convencionales. En primer lugar, se proporciona energía térmica sin quemar combustibles, reduciendo así la contaminación. En segundo lugar, los recursos energéticos convencionales se conservan. En tercer lugar, los estanques solares junto con unidades de desalinización se pueden usar para purificar agua contaminada o mineralmente reducida, y el estanque en sí mismo puede convertirse en el recipiente de los residuos.

2.5 RESTRICCIONES DE UN ESTANQUE SOLAR

Una de las limitaciones es la selección del lugar, ya que no es posible construir estos estanques en cualquier sitio. Dado que un estanque solar es un captador horizontal, y como tal no puede inclinarse, se recomienda instalarlos en lugares con latitudes menores de 40°; sin embargo, existen algunos en regiones con más de 40° de latitud. Entre mayor sea la radiación solar incidente, mejor será la eficiencia del estanque. Es necesario contar con una fuente de sal, salmuera o salina cercana. El terreno debe ser lo más plano posible o con un perfil adecuado para reducir al mínimo las excavaciones. A menos que la compactación del suelo sea lo suficientemente segura para impedir filtraciones, no sería aconsejable construir un estanque solar sobre un manto acuífero. Se requiere contar con agua (agua de mar o salmuera con salinidades del 5 % podrían ser utilizadas) disponible para suministrar sobre la superficie, la que se pierde por evaporación. Ya que la mitad del espectro solar es de radiación infrarroja, ésta se absorbe en los primeros centímetros de la superficie del estanque; en consecuencia, no llega al fondo, por lo que en teoría un lago no podría tener eficiencias de captación mayores de 50 %. En la práctica son de 20 % o menores, dependiendo entre otras cosas de la claridad. A semejanza de las plantas de la industria química, la eficiencia y economía mejora con el tamaño. Hasta la fecha no se conoce cuál podría ser el tamaño mínimo con aplicaciones o con fines prácticos; no obstante, se recomienda que una

hectárea para la producción de calor es práctica, y de varias hectáreas si se quiere generar electricidad.

2.6 APLICACIONES

Existen diversas aplicaciones para los estanques solares, entre las cuales podemos mencionar las siguientes: desalación de agua, producción de sal, calentamiento de aire, calefacción de edificios, secado solar, enfriamiento de edificios, cocinado de alimentos, generación de electricidad, etc. Sin embargo, para fines de este trabajo de tesis nos enfocaremos a la desalación de agua.

2.6.1 Desalación de agua

La demanda, cada vez en aumento, para emplear agua, se debe principalmente a la elevación de los niveles de vida, industrialización progresiva, expansión de irrigación para agricultura, aumento de la erosión en zonas que no eran áridas, la continua deforestación y el gran incremento de población.

De diversos estudios realizados por organizaciones internacionales se puede concluir que se necesitan plantas desaladoras con capacidades de producción del orden de 8×10^6 [m³/día], [Almanza y Muñoz, 2003]. También se observa que las reservas superficiales de agua, además de no ser suficientes, han disminuido en forma alarmante. Una de las aplicaciones más importantes de los estanques solares es la desalación del agua. En combinaciones con sistemas tradicionales de evaporación pueden producirse grandes cantidades de agua potable. Además, es factible considerar que una gran cantidad de lugares con carencia de agua, generalmente reciben una insolación alta, por lo que es justificado recurrir a la energía solar para desalar agua.

2.7 CONSTRUCCIÓN DE UN ESTANQUE SOLAR

La construcción de un estanque solar es muy sencilla. En la base del estanque, la cantidad calculada de sal se mezcla con agua dulce hasta que el estanque está medio lleno. Con el fin de mantener el gradiente de salinidad, la salmuera se inyecta en la zona de baja convección (ZBC) y el agua dulce se ofrece a través de la zona de alta convección (ZAC).

El trabajo de un estanque solar es muy simple. Sales como el cloruro de magnesio, cloruro de sodio o nitrato de sodio se disuelven en el agua con la concentración que varía entre 20 y 30% en el fondo a casi cero en la parte superior. Con el fin de mantener el gradiente salino, el agua dulce se añade en la parte superior del estanque, mientras que agua salina es retirada, al mismo tiempo, la salmuera concentrada se añade en la parte inferior de la laguna.

Un ejemplo real de un estanque solar es el proyecto El Paso, el cual se inició cuando la Universidad de Texas descubrió un estanque solar existente de 3,350 [m²] y 3 [m] de profundidad situado en Bruce Foods, una planta de enlatado, en el noreste de El Paso, Texas (figuras 2.5 y 2.6). El estanque fue utilizado por el anterior propietario como fuente de agua para protección contra incendios, pero una conexión para el suministro de agua a la ciudad, eliminó la necesidad del estanque. Se obtuvo apoyo del departamento interior de dirección de rehabilitación de tierras, la

planta de enlatado Bruce Foods, y la compañía eléctrica de El Paso, para convertir el estanque de almacenamiento existente en un estanque solar.

La construcción se inició a principios de 1985, y para la primavera de ese año se había colocado una nueva línea sobre la existente. Asimismo, estanques de evaporación para reciclaje de sal y difusores de entrada y de descarga para entregar la salmuera caliente del fondo del estanque habían sido construidos. El gradiente salino fue establecido y la temperatura de la zona de almacenamiento del estanque se elevó rápidamente. Tras la construcción y puesta en marcha del estanque, el énfasis por el proyecto se amplió para incluir aplicaciones útiles.



Figuras 2.5 y 2.6. Estanque solar en El Paso Texas, EUA en funcionamiento desde 1986.

2.8 MODELO MATEMÁTICO

Para conocer el comportamiento de un estanque solar en México con diferentes niveles de radiación y otras condiciones ambientales se desarrolló el siguiente modelo matemático:

A partir de la ecuación de energía unidimensional, puesto que se supone que las dimensiones laterales del estanque son mucho mayores que su profundidad, y considerando que las tres zonas se encuentran bien definidas (figura 2.7), que existe continuidad de las propiedades y que la temperatura es uniforme en las zonas superior e inferior, ya que son zonas mezcladas, puede plantearse una ecuación para cada zona.

- Balance de energía, zona convectiva superior

Para la zona no convectiva superior, donde existe convección, se tiene un fluido perfectamente mezclado, por lo que:

$$\rho c_p z_1 \frac{\partial T}{\partial t} = \underbrace{k \frac{\partial T}{\partial t} \Big|_{z_1}}_C - \underbrace{\dot{Q}_p}_B + \underbrace{H(1 - \alpha_\lambda) (1 - h(z_1))}_A \quad (2.1)$$

En donde, A , es la energía solar absorbida en esta zona, B , son las pérdidas de calor a la atmósfera, y C , la conducción de calor desde las zonas inferiores.

- Balance de energía, zona de gradiente (no convectiva)

La zona no convectiva puede aproximarse como un sólido, debido a que existe un gradiente salino; en ella la temperatura depende de la profundidad, estando dada por:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) - H (1 - \epsilon_\lambda) \frac{dh(z)}{dz} \quad (2.2)$$

El último término, del lado derecho, representa una fuente de energía y es la radiación solar absorbida por el agua.

- Balance de energía, zona convectiva inferior.

Para la zona convectiva inferior, que también es mezclada, se tiene:

$$\rho C_p (z_3 - z_2) \frac{\partial T}{\partial t} = \overbrace{k_t \frac{\partial T}{\partial t} \Big|_{z_3}}^A - \overbrace{k \frac{\partial T}{\partial t} \Big|_{z_2}}^B + \overbrace{H (1 - \epsilon_\lambda) h(z_2)}^C - \overbrace{\dot{U}}^D \quad (2.3)$$

En donde C representa la radiación que llega a la zona y, absorbiéndose completamente, D , es la extracción de energía, A , la pérdida de calor al suelo debajo del estanque y, B , la conducción de calor hacia las zonas superiores.

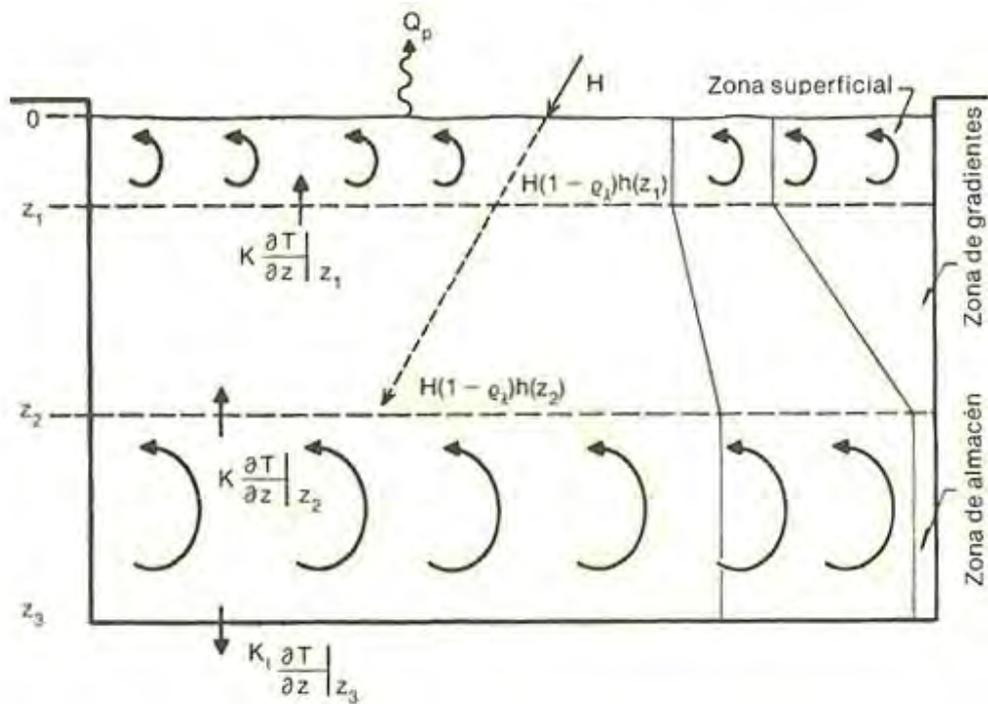


Figura 2.7. Modelo del estanque solar.

Para predecir el comportamiento matemático del estanque solar se debe resolver la ecuación 2.2, tomando como condiciones a la frontera a las ecuaciones 2.1 y 2.3. Para la condición inicial se deberá tomar en cuenta una fecha determinada.

2.8.1 Solución analítica

Puesto que la solución analítica formal para este sistema es sumamente compleja o imposible de obtener, se deben hacer algunas simplificaciones; éstas se proponen de acuerdo con el interés de conocer la temperatura en el fondo del estanque:

1. Las propiedades de la solución salina, k , ρ , y C_p se conservan constantes.
2. La temperatura de la zona superior es igual a la temperatura ambiente.
3. Las pérdidas de calor en el fondo son hacia un sumidero infinito a una temperatura (T_g) y una distancia (Δz_2) definida, es decir:

$$k_t \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z_3} = k_t \frac{(T_g - T)}{\Delta z_2} \quad (2.4)$$

4. Las pérdidas de calor del fondo hacia la superficie se discretizan linealmente.

$$k \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z_2} = k \frac{T_a - T}{z_1 - z_2} \quad (2.5)$$

De tal forma que el perfil de temperatura en la zona no convectiva es lineal, lo que permite simplificar la ecuación 2.5 y considerar esta zona como un sólido aislante.

5. La radiación total se considera directa y se recibe con un ángulo de incidencia fijo.

Así, la ecuación 2.3 para el estado sin extracción de energía se resuelve, [Almanza y Muñoz, 2003].

Cambiando de variable de t a τ se llega a:

$$T = A + \sqrt{B^2 + D^2} \cos(\omega\tau - \sigma') + Y e^{\alpha(\varepsilon - \tau)} \quad (2.6)$$

Donde:

$$A = \left(\frac{Hh'}{\alpha} + \frac{\alpha_1 T_a}{d\Delta z_1 \alpha} + \frac{K_1 T_g}{dqC_p \Delta z_2 \alpha} \right) \quad (2.7)$$

$$B = \left(\frac{1}{\alpha^2 + \omega^2} \right) \left(H_0 h' \alpha + \frac{\alpha_1 T_{a0} \alpha \cos \delta_2}{d\Delta z_1} - \frac{\alpha_1 T_{a0} \omega \sin \delta_a}{d\Delta z_1} \right) \quad (2.8)$$

$$D = \left(\frac{1}{\alpha^2 + \omega^2} \right) \left(H_0 h' \omega + \frac{\omega T_{a0} \alpha_1 \cos \delta_a}{d\Delta z_1} + \frac{\alpha_1 T_{a0} \alpha \sin \delta_a}{d\Delta z_1} \right) \quad (2.9)$$

$$Y = T_e - \left(A + \sqrt{B^2 + D^2} \cos(\omega\varepsilon - \delta') \right) \quad (2.10)$$

$$\delta' = \arctan\left(\frac{D}{B}\right) \quad (2.11)$$

2.8.2 Solución numérica

En la solución anterior se obtiene indirectamente la temperatura de la zona inferior, por lo que se propone una solución numérica para el sistema mediante su representación en diferencias finitas (método implícito), considerando las mismas simplificaciones, excepto en 2 y la discretización lineal de 4, lo que permite obtener el perfil de temperaturas en la zona no convectiva. Así, la ecuación 2.2 queda representada por:

$$-\alpha_t \lambda T(n-1, t+1) + (1 + 2\alpha_t \lambda) T(n, t+1) - \alpha_t \lambda T(n+1, t+1) = T(n, t) - \frac{\alpha_t}{K} \lambda \Delta z H'(t+1)(h(n) - h(n-1)) \quad (2.12)$$

Las zonas superior e inferior son las condiciones de frontera para ésta ecuación.

De la ecuación de la frontera superior, que corresponde al punto cero de la zona no convectiva, se obtiene la expresión para la temperatura de dicha zona ($T(0, t+1)$), que se sustituye en la ecuación 2.12 para el estrato 1, es decir $n = 1$.

De manera similar para la frontera inferior, que corresponde al punto $N + 1$, se obtiene su temperatura ($T(N+1, t+1)$), que se sustituye en la ecuación 2.12 para el estrato N .

Con la ecuación 2.12 y las correspondientes para los estratos 1 y N se logra un sistema para los N estratos considerados, siendo éste una matriz tridiagonal factible de ser resuelta por el método de eliminación gaussiano.

2.8.3 Extracción de energía

El análisis anterior corresponde al régimen transitorio sin extracción de energía. Por consiguiente, después de cierto intervalo de tiempo, en el que la solución salina se calienta hasta un nivel en el cual puede ser utilizada, es posible extraer energía.

Es factible extraer la energía como un porcentaje de la radiación recibida ($U = \% H$) o variándola de tal forma que la temperatura de la zona inferior permanezca constante.

La solución analítica en este último caso permite calcular fácilmente esta extracción para el régimen estacionario, con lo que se obtiene:

$$U(\tau) = q C_p d\alpha (A - T_{op}) + \sqrt{\alpha^2 + \omega^2} q C_p d\sqrt{B^2 + D^2} \cos(\omega\tau - \gamma_u) \quad (2.13)$$

La solución numérica permite resolver el problema de manera simple, aun en el régimen transitorio. Así, en la ecuación para la zona inferior, la parcial de T con respecto del tiempo es cero ($\partial T/\partial t = 0$); por consiguiente, la extracción de energía estará dada por:

$$U(t+1) = H'(t+1)h(N+1) - \left(\frac{k_t}{r} + k\right) \frac{T_{op}}{\Delta z} + \frac{k_t T_g}{r\Delta z} + k \frac{T(N,t+1)}{\Delta z} \quad (2.14)$$

- Resultados.

Mediante la información obtenida de diversas fuentes, [Almanza y Muñoz, 2003], se obtiene la temperatura de la zona inferior para dos lugares del país durante el transcurso del tiempo, sin extracción de energía y sin considerar días nublados, la cual es la máxima teórica (figura 2.8).

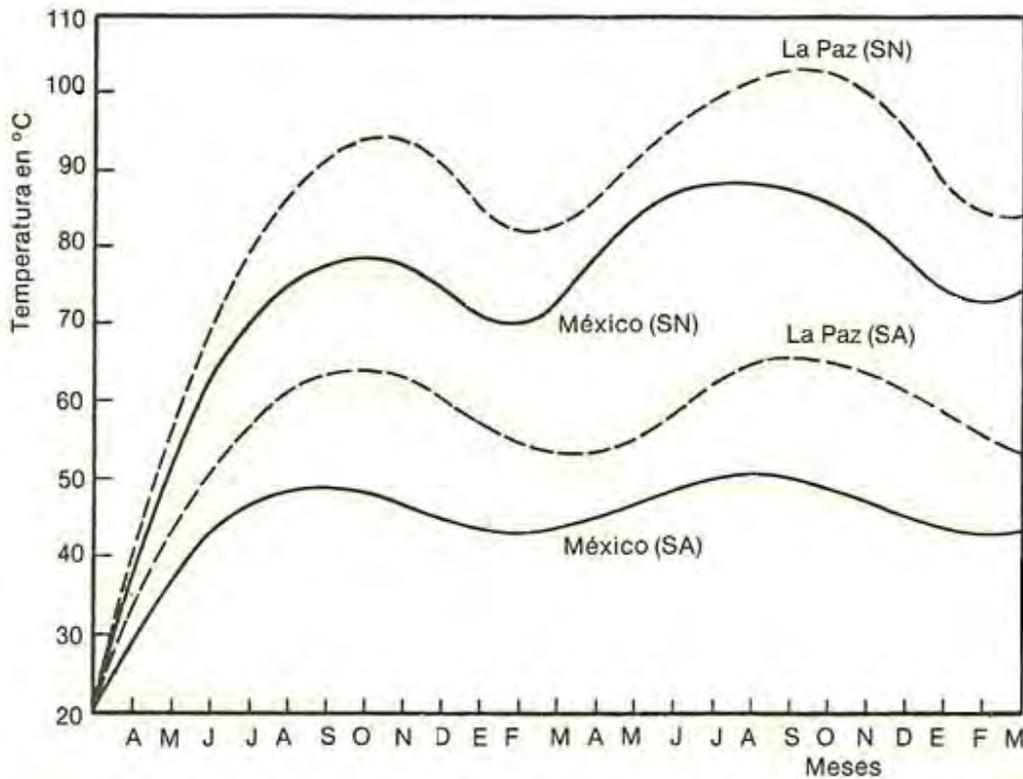


Figura.2.8. Calentamiento teórico del estanque obtenido por las soluciones analítica (SA) y numérica (SN).

En la figura 2.8 se puede apreciar la diferencia entre los resultados de la solución analítica y la numérica, ya que la solución numérica da valores más altos que la analítica, lo cual se debe a que ésta únicamente toma en cuenta la radiación recibida por la zona inferior para su calentamiento, mientras que la numérica, además de considerar la radiación que a esta llegue, también considera que, en función del tipo de perfil de temperatura que presente la zona no convectiva, el término $\frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z_2}$ puede ser negativo, lo que implica una ganancia extra de energía producida por el fenómeno de conducción. Es importante mencionar que esto aparece por lo general en la puesta en marcha de un estanque solar.

Al considerar la extracción de energía como un porcentaje de la radiación, este se toma como 7 % y se empieza a extraer después de cuatro meses de iniciado el proceso u operación.

La energía que se extrae en La Paz, BCS, de acuerdo con la solución analítica y con base en la figura 2.8, es:

$$U = 16.1 + 2.5 \cos \omega\tau \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (2.15)$$

Y en México, D.F.:

$$U = 14 + 1.7 \cos \omega\tau \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (2.16)$$

La tabla 2.1 muestra la potencia media anual para los tres posibles casos al 7 % de extracción, por medio de la solución numérica. Con esta eficiencia de captación, la potencia media anual, en $[W/m^2]$, que puede extraerse es del orden de 9.6 y hasta 16.2 para La Paz y desde 8.1 y hasta 14 para el D.F., [Almanza y Muñoz, 2003]:

	La Paz, BCS $[W/m^2]$	México ,D.F. $[W/m^2]$
Sin días nublados (SDN)	16.2	14
Con días nublados (DN)	14.3	11.5
Con días nublados y seminublados (DN y S)	9.6	8.1

Tabla 2.1. Potencia media anual al 7 % de extracción.

NOMENCLATURA CAPÍTULO 2

- Alfabeto convencional

\dot{Q}_p – (Calor cedido al ambiente) [kJ/kg]

C_p – (Coeficiente de capacidad térmica específica) [kJ/kg °C]

N – (Estrato)

U – (Extracción de energía) [kJ]

z_1 – (Profundidad de la zona convectiva superior del estanque solar) [m]

z_2 – (Profundidad de la zona de gradiente del estanque solar) [m]

z_3 – (Profundidad de la zona inferior del estanque solar) [m]

k – (Propiedad salina)

H – (Radiación solar incidente en la zona convectiva superior) [W/m^2]

h – (Radiación solar incidente en la zona de gradiente) [W/m^2]

T – (Temperatura) [°C]

T_g – (Temperatura en el fondo del estanque) [°C]

t – (Tiempo) [s]

- Símbolos griegos

ρ – (Densidad) [kg/m^3]

ΔT – (Diferencia de temperatura) [°C]

Δz_2 – (Distancia definida en el fondo del estanque) [m]

τ – (Tiempo) [s]

3

PRINCIPIOS DEL PROCESO DESALADOR DE EME

3.1 INTRODUCCIÓN

Ahora bien, después de haber descrito en capítulos anteriores tanto a la radiación solar como al estanque solar, los cuales en conjunto proveerán la energía que necesita el proceso desalador EME, se definirá dicho proceso desalador EME, el cual recibirá y aprovechará dicha energía para llevar a cabo el proceso. En este sentido, el proceso de desalación de múltiple efecto (EME) el cual se lleva a cabo en una serie de evaporadores llamados efectos, el principio de operación es la reducción de la presión a través de los efectos de una forma escalonada. La presión dentro de las cámaras es de vacío. Esto permite que el agua pueda evaporar a temperaturas cada vez más bajas y que el vapor obtenido en cada cámara pueda ceder su energía en la siguiente. El agua de alimentación se hace pasar por el primer efecto, donde es rociada mediante un sistema de aspersores sobre la superficie de los tubos del evaporador, donde recibe energía calorífica de la fuente de alimentación que pasa por el interior de los tubos; como consecuencia, parte del agua se evapora. El vapor obtenido se manda a la siguiente cámara, la cual se encuentra a una presión más baja, entra en un intercambiador de calor donde cede su calor latente hasta ser condensado, se recolecta en un depósito para después ser extraído mediante un sistema de bombeo para formar parte del producto. El calor cedido permite la evaporación del agua que se rocía sobre los tubos en la segunda cámara. Este proceso de evaporación y condensación es repetido sucesivamente de efecto a efecto, cada uno con menor presión y temperatura.

3.2 EVAPORADORES DE MÚLTIPLE EFECTO

En la figura 3.1, se representan tres evaporadores de tubos cortos, de circulación natural, conectados para formar un sistema de triple efecto. Las conexiones se realizan de forma tal que el vapor procedente de un efecto sirve como medio de calentamiento para el efecto contiguo. El último efecto es aquel que tiene la menor presión en el espacio de vapor, de forma que en un sistema EME la diferencia de vapor entre el vapor vivo y el condensador se extiende a lo largo de dos o más efectos. La presión en cada efecto es menor que en el efecto del cual recibe el vapor y superior a la del efecto al que suministra vapor.

El acoplamiento de una serie de unidades de evaporación para formar un sistema EME es una cuestión que afecta a la conexión de tuberías y no a la estructura de las unidades individuales. La numeración de los efectos es independiente del orden que la alimentación siga en ellos. La alimentación diluida entre el primer efecto, donde se concentra parcialmente, pasa al segundo efecto para sufrir una concentración adicional y por último, al tercer efecto para alcanzar la concentración final. La solución concentrada se extrae del tercer efecto mediante una bomba.

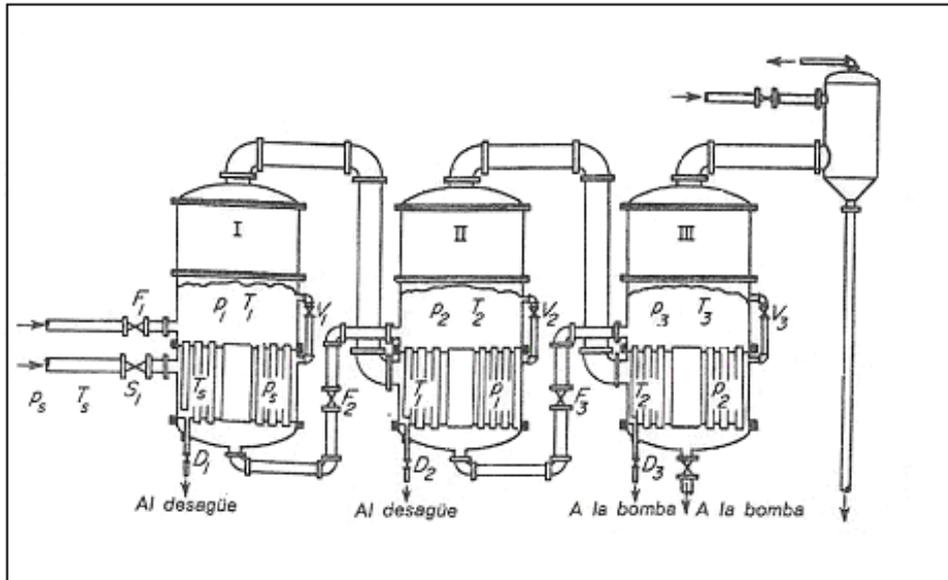


Figura 3.1. Evaporador de triple efecto.

Donde, I, II, III, representan a los efectos primero, segundo y tercero respectivamente, D_1 , D_2 , D_3 , las válvulas para el condensado, F_1 , F_2 , F_3 , las válvulas para controlar el flujo de la alimentación y de las soluciones, S_1 , la válvula de vapor vivo, V_1 , V_2 , V_3 , las válvulas para purga de no condensables, P_s , P_1 , P_2 , P_3 , las presiones, y T_s , T_1 , T_2 , T_3 , las temperaturas.

En la operación en régimen estacionario, las velocidades de flujo y las velocidades de evaporación son tales que en ninguno de los efectos hay acumulación o vaciamiento de soluto o disolvente. Una vez que se fijan la temperatura, concentración, y velocidad de flujo de la alimentación, se establecen las presiones en el vapor de entrada y en el condensador, y se mantienen los niveles de las soluciones en los distintos efectos, todas las concentraciones, velocidades de flujo, presiones y temperaturas en los efectos se establecen automáticamente y permanecen constantes por si solas durante la operación. La concentración de la solución concentrada solamente se puede modificar variando la velocidad de flujo de la alimentación. Si la solución concentrada es demasiado diluida se disminuye la velocidad de alimentación, y se aumenta si resulta demasiado concentrada. Transcurrido algún tiempo, la concentración del último efecto, y por tanto la solución concentrada, alcanza un nuevo régimen estacionario para el valor deseado.

La superficie de calentamiento del primer efecto transmite una cantidad de calor dada por la ecuación:

$$\dot{Q}_1 = A_1 U_1 \Delta T_1 \quad (3.1)$$

Donde:

A_1 = Área de transferencia de calor del efecto 1.

U_1 = Coeficiente de transferencia de calor para el efecto 1.

ΔT_1 = Caída de temperatura en el efecto 1.

Si se desprecia, por el momento, la parte de este calor necesaria para calentar la alimentación hasta el punto de ebullición, resulta que prácticamente todo aparece como calor latente en el vapor que sale del primer efecto. Por consiguiente, en la operación en régimen estacionario, prácticamente todo el calor consumido en la creación de vapor en el primer efecto es cedido en el segundo durante la condensación de ese mismo vapor. El calor transmitido en el segundo efecto (\dot{Q}_2) viene dado por la ecuación:

$$\dot{Q}_2 = A_2 U_2 \Delta T_2 \quad (3.2)$$

Donde:

A_2 = Área de transferencia de calor del efecto 2.
 U_2 = Coeficiente de transferencia de calor para el efecto 2.
 ΔT_2 = Caída de temperatura en el efecto 2.

Pero, según se ha indicado anteriormente, \dot{Q}_1 y \dot{Q}_2 son aproximadamente iguales, y por consiguiente,

$$A_1 U_1 \Delta T_1 = A_2 U_2 \Delta T_2 \quad (3.3)$$

Utilizando el mismo razonamiento para el efecto 3, tendremos que, aproximadamente:

$$A_1 U_1 \Delta T_1 = A_2 U_2 \Delta T_2 = A_3 U_3 \Delta T_3 \quad (3.4)$$

Donde:

A_3 = Área de transferencia de calor del efecto 3.
 U_3 = Coeficiente de transferencia de calor para el efecto 3.
 ΔT_3 = Caída de temperatura en el efecto 3.

Es preciso tener en cuenta que las ecuaciones 3.1 y 3.2 son solamente ecuaciones aproximadas que hay que corregir mediante la adición de términos que, sin embargo, son relativamente pequeños comparados con los que intervienen en dichas expresiones. En la práctica, las áreas de calentamiento de los efectos de un evaporador de múltiple efecto son iguales, con el fin de conseguir una mayor economía constructiva. Con esta condición, la ecuación 3.4 se transforma en:

$$U_1 \Delta T_1 = U_2 \Delta T_2 = U_3 \Delta T_3 = \frac{\dot{Q}}{A} \quad (3.5)$$

En donde se deduce que en un evaporador de múltiple efecto las caídas de temperatura son, de forma aproximada, inversamente proporcionales a los coeficientes de transmisión de calor.

3.3 MÉTODOS DE ALIMENTACIÓN

La forma habitual de alimentar un evaporador de múltiple efecto consiste en introducir, mediante una bomba, la alimentación diluida en el primer efecto y hacerla pasar sucesivamente a través de los demás efectos, según se indica en la figura 3.2 (a), mostrada más adelante. Este método recibe el nombre de alimentación directa. La concentración de la solución crece al pasar del primero al

último efectos, operando con el modelo de flujo más sencillo. Se necesita una bomba para introducir la alimentación diluida en el primer efecto, que generalmente está a una presión superior a la atmosférica, y una bomba para extraer la solución concentrada del último efecto. Sin embargo, el paso de un efecto a otro se puede realizar sin bombas, ya que el flujo tiene lugar en el sentido de presiones decrecientes, siendo suficiente situar válvulas de control en las tuberías de conexión.

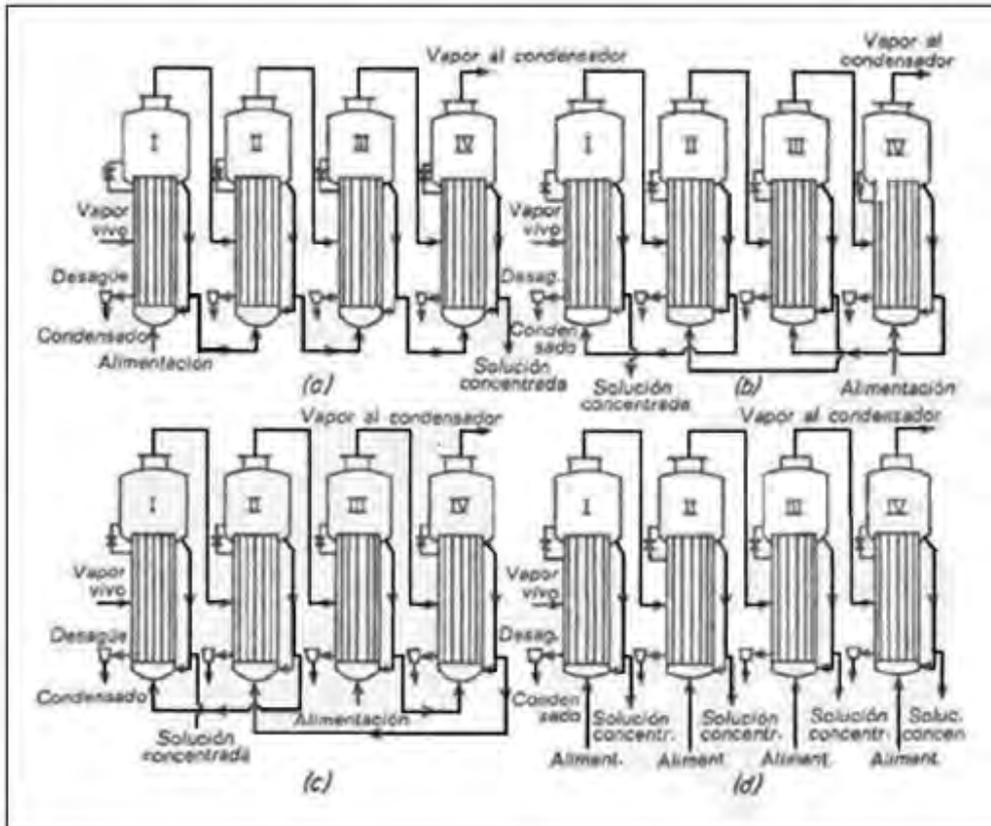


Figura 3. 2. Formas de circular la alimentación en evaporadores de múltiple efecto: (a) directa. (b) inversa. (c) Mixta. (d) Paralela.

Otro método frecuentemente utilizado es la alimentación inversa, en el cual la alimentación diluida se introduce en el último efecto y se bombea a través de los efectos sucesivos hasta el primero, según se representa en la figura 3.2 (b). La alimentación inversa da lugar generalmente a una mayor capacidad que la alimentación directa cuando la solución concentrada es muy viscosa, y proporciona una mayor economía de vapor cuando la alimentación entra fría.

A veces se utilizan otras formas de alimentación. En la alimentación mixta, la solución diluida entra en un efecto intermedio, circula con alimentación directa hasta el último efecto de la serie y después se bombea en sentido contrario hacia los primeros efectos para alcanzar la concentración final, según se indica en la figura 3.2 (c). Esto elimina algunas de las bombas necesarias en la alimentación inversa y permite realizar la evaporación final a la temperatura más elevada. En los

evaporadores de cristalización, en los que se retira una suspensión de cristales, la alimentación se puede introducir directamente en cada efecto, dando lugar a lo que se llama alimentación paralela que se representa en la figura 3.2 (d). En la alimentación paralela no hay paso de solución de un efecto a otro.

3.4 CAPACIDAD Y ECONOMÍA DE LOS EVAPORADORES DE MÚLTIPLE EFECTO

El incremento de economía que se consigue con la evaporación de múltiple efecto se realiza a costa de reducir la capacidad. Cabría pensar que, puesto que el área de la superficie de calentamiento se hace varias veces mayor, la capacidad de evaporación debiera de aumentar, pero en realidad no ocurre así. La capacidad total de un evaporador de múltiple efecto no es mayor que la de uno de simple efecto que tiene una superficie de calentamiento igual a la de uno de los efectos y que opera con las mismas condiciones extremas. La cantidad de agua vaporizada por metro cuadrado de superficie en un evaporador que consta de N efectos es aproximadamente igual (1/N) veces la capacidad del efecto simple, según se deduce del análisis que se hace a continuación.

Si la carga de calentamiento y el calor de dilución son despreciables, la capacidad del evaporador es directamente proporcional a la velocidad de transmisión de calor. El calor transmitido en los tres efectos de la figura 3.1 viene dado por las ecuaciones:

$$\dot{Q}_1 = U_1 A_1 \Delta T_1 \qquad \dot{Q}_2 = U_2 A_2 \Delta T_2 \qquad \dot{Q}_3 = U_3 A_3 \Delta T_3 \qquad (3.6)$$

La capacidad total es proporcional a la velocidad total de transmisión de calor q, la cual se obtiene sumando estas tres ecuaciones:

$$\dot{Q} = \dot{Q}_1 + \dot{Q}_2 + \dot{Q}_3 = U_1 A_1 \Delta T_1 + U_2 A_2 \Delta T_2 + U_3 A_3 \Delta T_3 \qquad (3.7)$$

Suponiendo que el área de la superficie de cada efecto, A, y que el coeficiente global, U, es también el mismo para cada efecto, la ecuación 3.7 se transforma en:

$$\dot{Q} = UA(\Delta T_1 + \Delta T_2 + \Delta T_3) = UA\Delta T \qquad (3.8)$$

Siendo ΔT la caída total de temperatura entre el vapor que condensa en el primer efecto y el vapor que sale del último.

Supongamos ahora que un evaporador de simple efecto, de área A, opera con la misma caída total de temperatura. Si el coeficiente global es el mismo que en cada uno de los efectos del evaporador de triple efecto, la velocidad de transmisión de calor en el efecto simple es:

$$\dot{Q} = UA\Delta T \qquad (3.9)$$

Que es exactamente la misma ecuación que para el evaporador de múltiple efecto. Sea cual fuere el número de efectos utilizados, con tal de que los coeficientes globales sean los mismos, la capacidad no será superior a la de un simple efecto cuya superficie sea igual a la de cada uno de los efectos de la unidad múltiple. En la práctica, debido a la elevación del punto de ebullición y a

otros factores, la capacidad de un evaporador de múltiple efecto es menor que la correspondiente a un simple efecto.

3.5 EFECTO DE LA CARGA DE LÍQUIDO Y DE LA ELEVACIÓN DEL PUNTO DE EBULLICIÓN

La carga de líquido y la elevación del punto de ebullición modifican todavía más la capacidad de un evaporador de múltiple efecto de lo que ocurre en uno de efecto sencillo. La reducción de capacidad originada por la carga del líquido tampoco puede en este caso calcularse cuantitativamente. Como se recordará, la carga del líquido reduce la caída de temperatura disponible en el evaporador. La elevación del punto de ebullición reduce también la caída de temperatura disponible en cada efecto de un evaporador de efecto múltiple, según veremos a continuación.

Consideremos un evaporador que está concentrando una solución con una gran elevación del punto de ebullición. El vapor procedente de esta solución en ebullición está a la temperatura de la solución y, por consiguiente, sobrecalentado en una cantidad equivalente a la elevación del punto de ebullición.

Según se ha visto, cuando se utiliza como medio de calentamiento, el vapor sobrecalentado es esencialmente equivalente al vapor saturado de la misma presión. Por tanto, la caída de temperatura en un efecto cualquiera se calcula a partir de la temperatura del vapor saturado a la presión de la cámara de condensación, y no a partir de la temperatura de ebullición del líquido en el efecto anterior. Esto quiere decir que, de la caída total de temperatura disponible, se pierde la elevación del punto de ebullición que tiene lugar en cada efecto. Esta pérdida se produce en cada uno de los efectos de un evaporador de efecto múltiple y la pérdida de capacidad que resulta es con frecuencia importante.

En la figura 3.3, se representa la influencia de estas pérdidas en la caída de temperatura sobre la capacidad de un evaporador de múltiple efecto. Las condiciones extremas son las mismas en los tres casos, es decir, la presión del vapor que condensa en el primer efecto y la temperatura de saturación que sale del último son idénticas en los tres evaporadores. Cada efecto contiene una solución con una determinada elevación del punto de ebullición. La altura total de cada columna representa la diferencia total de temperatura entre la temperatura del vapor vivo y la de saturación del vapor que sale del último efecto.

Consideremos el evaporador de simple efecto. De la caída total de temperatura, la parte rayada representa la pérdida en la caída de temperatura debida a la elevación del punto de ebullición. La caída de temperatura restante, que corresponde a la fuerza impulsora real para la transmisión de calor, está representada por la parte blanca. El diagrama para el evaporador de doble efecto presenta dos porciones rayadas, debido a la elevación del punto de ebullición que se produce en los dos efectos; y la parte residual blanca es menor que en el diagrama del simple efecto. En el evaporador de triple efecto hay tres porciones rayadas, correspondientes a las pérdidas de caída de temperatura en cada efecto, y la caída de temperatura neta total disponible es todavía menor.

La figura 3.3 indica que en los casos extremos de un gran número de efectos, o elevaciones muy grandes del punto de ebullición, la suma de las elevaciones del punto de ebullición en un

evaporador proyectado podría ser mayor que la caída total de temperatura disponible. La operación resulta imposible en estas condiciones y es preciso revisar el diseño o las condiciones de operación del evaporador con el fin de reducir el número de efectos o aumentar la caída total de temperatura.

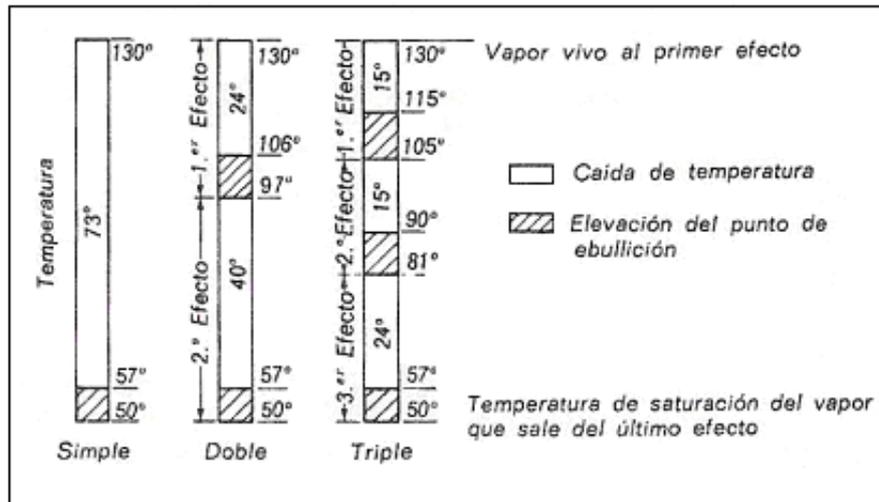


Figura 3.3. Influencia de la elevación del punto de ebullición sobre la capacidad de un evaporador.

La economía de un evaporador de múltiple efecto no se modifica por las elevaciones del punto de ebullición si no se tienen en cuenta factores de menor importancia, tales como la temperatura de la alimentación y las variaciones de los calores de vaporización. Un kilogramo de vapor vivo que condensa en el primer efecto genera aproximadamente un kilogramo de vapor, que condensa en el segundo, generando otro kilogramo, y así sucesivamente. La economía de un evaporador de múltiple efecto depende del balance de energía y no de la velocidad de transmisión de calor. Sin embargo la capacidad se reduce con la elevación del punto de ebullición. La capacidad de un evaporador de doble efecto que concentra una solución que tiene elevación del punto de ebullición es inferior a la mitad de la capacidad de dos efectos simples, cada uno de los cuales opera con la misma caída global de temperatura. La capacidad de un triple efecto es, por la misma razón, menor que la tercera parte de la de tres efectos simples que operan con las mismas temperaturas extremas.

3.6 NÚMERO ÓPTIMO DE EFECTOS

El costo de un evaporador, por metro cuadrado de superficie, es una función del área total de todos los efectos, y disminuye con el área total, tendiendo a una asíntota para grandes instalaciones. Cuando el costo de 1 [m²] de superficie de calentamiento es constante, con independencia del número de efectos, la inversión necesaria para un evaporador de N efectos es N veces mayor que la de un evaporador de simple efecto de la misma capacidad. El número óptimo de efectos se obtiene a partir de un balance económico, teniendo en cuenta el ahorro de vapor que se consigue con la operación en múltiple efecto y el aumento de inversión que se necesita.

NOMENCLATURA CAPÍTULO 3

- Alfabeto convencional

a – (Alimentación directa)

b – (Alimentación inversa)

c – (Alimentación mixta)

d – (Alimentación paralela)

A_1 – (Área de transferencia de calor del efecto 1) [m^2]

A_2 – (Área de transferencia de calor del efecto 2) [m^2]

A_3 – (Área de transferencia de calor del efecto 3) [m^2]

\dot{Q}_1 – (Calor transmitido en el efecto 1) [kJ/kg]

\dot{Q}_2 – (Calor transmitido en el efecto 2) [kJ/kg]

\dot{Q}_3 – (Calor transmitido en el efecto 3) [kJ/kg]

U_1 – (Coeficiente de transferencia de calor para el efecto 1) [$kW/m^2\text{°C}$]

U_2 – (Coeficiente de transferencia de calor para el efecto 2) [$kW/m^2\text{°C}$]

U_3 – (Coeficiente de transferencia de calor para el efecto 3) [$kW/m^2\text{°C}$]

I – (Efecto 1)

II – (Efecto 2)

III – (Efecto 3)

P_s – (Presión del vapor vivo) [Pa]

P_1 – (Presión en el efecto 1) [Pa]

P_2 – (Presión en el efecto 2) [Pa]

P_3 – (Presión en el efecto 3) [Pa]

T_s – (Temperatura del vapor vivo) [$^{\circ}C$]

T_1 – (Temperatura en el efecto 1) [$^{\circ}C$]

T_2 – (Temperatura en el efecto 2) [$^{\circ}C$]

T_3 – (Temperatura en el efecto 3) [$^{\circ}C$]

V_1 – (Válvula de vapor vivo en el efecto 1)

V_2 – (Válvula de vapor vivo en el efecto 2)

V_3 – (Válvula de vapor vivo en el efecto 3)

D_1 – (Válvula para el condensado en el efecto 1)

D_2 – (Válvula para el condensado en el efecto 2)

D_3 – (Válvula para el condensado en el efecto 3)

F_1 – (Válvula para el flujo de alimentación en el efecto 1)

F_2 – (Válvula para el flujo de alimentación en el efecto 2)

F_3 – (Válvula para el flujo de alimentación en el efecto 3)

S_1 – (Válvula para el flujo de las soluciones)

- Símbolos griegos

ΔT_1 – (Caída de temperatura en el efecto 1) [$^{\circ}C$]

ΔT_2 – (Caída de temperatura en el efecto 2) [$^{\circ}C$]

ΔT_3 – (Caída de temperatura en el efecto 3) [$^{\circ}C$]

4

BALANCES DE MASA Y ENERGÍA EN EL PROCESO DE EME

4.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presenta el modelo matemático simplificado, el cual proporciona una eficiente y simple herramienta para el diseño y evaluación del sistema. El modelo es resuelto a través de una simple secuencia de cálculos manuales. Las iteraciones no son exhaustivas y no requieren programación. Incluso, las hipótesis invocadas en el desarrollo del modelo no sacrifican procesos fundamentales, específicamente, misma área de transferencia de calor en todos los efectos.

4.2 MODELADO DEL PROCESO DE EME

Los datos generados por el modelo son limitados con las propiedades de efecto siguientes:

- Salmuera y caudales de destilado.
- Concentración de salmuera.
- Temperatura.
- Área de transferencia de calor.

Las ecuaciones del modelo excluyen a la cámara de evaporación instantánea y los precalentadores. La expresión aplicable al condensador puede ser incluida y su solución es hecha sobre la finalización de las iteraciones de los efectos. Las siguientes hipótesis son hechas para desarrollar el modelo simplificado de EME:

- Coeficiente de capacidad térmica específica (C_p) constante, para el agua de mar a diferente temperatura y concentración.
- Pérdidas termodinámicas constantes en todos los efectos.
- Área de transferencia de calor constante en todos los efectos.
- El agua de mar de alimentación está a la temperatura de saturación del primer efecto.
- Igualdad en las cargas térmicas en todos los efectos.
- Los vapores formados no tienen sal.
- La fuerza motriz para la transferencia de calor en el efecto es igual a la diferencia de temperaturas entre la condensación y la evaporación.
- Las pérdidas de energía a los alrededores son insignificantes.

Considerando las hipótesis anteriores, el modelo matemático es desarrollado a continuación.

El número de ecuaciones de balance de masa y energía, las cuales pueden ser escritas para cada efecto, es 3. Esto supone que el agua de mar es modelada como una mezcla binaria de agua dulce y sal. Además hay "n" ecuaciones para la tasa de transferencia de calor en cada efecto, el cual relaciona el efecto de la carga térmica en el área, el coeficiente global de transferencia de calor, y la temperatura. Por lo tanto, un total de $4 \times n$ ecuaciones son usadas para obtener los perfiles del

gasto másico, concentración y temperatura a través de los efectos, así como los efectos del área de transferencia de calor.

Los valores desconocidos son los siguientes (tabla 4.1):

Caudal de salmuera, $B_1, B_2, \dots, B_{n-1}, B_n$	n desconocidas
Concentración de la salmuera, X_1, X_2, \dots, X_{n-1}	n-1 desconocidas
Caudal de destilado, $D_1, D_2, \dots, D_{n-1}, D_n$	n desconocidas
Temperatura de efecto, T_1, T_2, \dots, T_{n-1}	n-1 desconocidas
Gasto másico de vapor, m	1 desconocido
Área de transferencia de calor, A	1 desconocido
	Total = 4n desconocidas

Tabla 4.1. Valores desconocidos.

La solución de las ecuaciones para determinar las variables, requiere la especificación de los siguientes parámetros:

- Temperatura de vapor saturado, T_s .
- Temperatura de vapor en el efecto n, T_n .
- Concentración de sal en el flujo de salmuera del efecto n, X_n .
- Concentración de sal en el flujo de alimentación, X_f .
- Caudal total de destilado, \dot{m}_d .

La totalidad de las ecuaciones de balance de masa y sal son escritas para determinar el caudal del efecto n, B_n y el gasto másico de alimentación, \dot{m}_f . Estas ecuaciones son:

$$\dot{m}_f = \dot{m}_d + B_n \quad (4.1)$$

$$X_f \dot{m}_f = X_n B_n \quad (4.2)$$

Sustituyendo la expresión 4.1 en 4.2 tenemos:

$$B_n = \left(\frac{X_f}{X_n - X_f} \right) \dot{m}_d \quad (4.3)$$

Todas las variables en el lado derecho de la expresión 4.3 son previamente especificadas, por lo tanto, el valor de B_n puede ser calculado. El balance general, la expresión 4.1, es usada para determinar \dot{m}_f . Los cálculos de B_n y \dot{m}_f son hechos únicamente una vez, por lo que no están incluidos en la siguiente secuencia de iteraciones.

4.3 PERFILES DE TEMPERATURA

La carga térmica en todos los efectos es tomada como constante, por lo tanto:

$$\dot{Q}_1 = \dot{Q}_2 = \dots = \dot{Q}_{n-1} = \dot{Q}_n \quad (4.4)$$

Con:

$$\dot{Q}_1 = \dot{m}_s \lambda_s \quad (4.5)$$

Para el primer efecto y

$$\dot{Q}_i = D_i \lambda_{vi} \quad (4.6)$$

Para los efectos 2 a n.

Donde, \dot{Q}_i , es la carga térmica en el efecto i, \dot{m}_s es el gasto másico de vapor saturado, D_i es el flujo de destilado en el efecto i, λ_s el calor latente de vaporización a T_s , y λ_{vi} es el calor latente de los vapores formados en $(T_i - \Delta T_{pérdidas})$, y los subíndices i, s, y v, definen efecto i, vapor saturado, y vapor formado respectivamente. La carga térmica en cada efecto también puede ser definida en términos del área de transferencia de calor en el efecto, A, la temperatura motriz, ΔT , y el coeficiente global de transferencia de calor, U. Esto es:

$$\dot{Q}_i = A_i U_i \Delta T_i \quad (4.7)$$

Donde el área de transferencia de calor y la carga térmica son iguales para todos los efectos, entonces:

$$\frac{\dot{Q}_1}{A_1} = \frac{\dot{Q}_2}{A_2} = \dots = \dot{Q}_n - \frac{1}{A_{n-1}} = \frac{\dot{Q}_n}{A_n} \quad (4.8)$$

De las expresiones 4.7 y 4.8, la siguiente identidad también se aplica:

$$U_1 \Delta T_1 = U_2 \Delta T_2 = \dots = U_{n-1} \Delta T_{n-1} = U_n \Delta T_n \quad (4.9)$$

El total de la caída de temperatura a través de los efectos que se define como:

$$\Delta T = T_s - T_n \quad (4.10)$$

Donde T_s y T_n son las temperaturas del vapor saturado y vapor formado en el ultimo efecto, n, respectivamente. Ésta caída es también igual a la suma de las caídas de temperatura por efecto o:

$$\Delta T = \Delta T_1 + \Delta T_2 + \dots + \Delta T_{n-1} + \Delta T_n \quad (4.11)$$

Las expresiones 4.9 a 4.11 pueden utilizarse para definir ΔT_1 en términos del coeficiente global de transferencia de calor y la caída total de temperatura en todos los efectos. De la expresión 4.9, ΔT_2 puede ser expresada en términos de ΔT_1 , de la siguiente manera:

$$\Delta T_2 = \Delta T_1 \left(\frac{U_1}{U_2} \right) \quad (4.12)$$

También ΔT_3 puede ser expresada en términos de ΔT_2 por:

$$\Delta T_3 = \Delta T_1 \left(\frac{U_1}{U_2} \right) \left(\frac{U_2}{U_1} \right) \quad (4.13)$$

Lo cual se simplifica en $\Delta T_3 = \Delta T_1 (U_1/U_3)$. Lo mismo aplica para todos los otros efectos y esta relación general nos lleva a:

$$\Delta T_i = \Delta T_1 \left(\frac{U_1}{U_i} \right) \quad (4.14)$$

Substituyendo el resultado obtenido en la expresión 4.14 en la expresión 4.11 tenemos:

$$\Delta T = \Delta T_1 U_1 \left(\frac{1}{U_1} + \frac{1}{U_2} + \dots + \frac{1}{U_{n-1}} + \frac{1}{U_n} \right) \quad (4.15)$$

La expresión 4.15 es reescrita de la siguiente manera:

$$\Delta T_{1=} = \frac{\Delta T_t}{U_1 \sum_{i=1}^n \frac{1}{U_i}} \quad (4.16)$$

Si las estimaciones para U_i son hechas, entonces, la caída de temperatura puede ser obtenida de las expresiones 4.16 y 4.14. El perfil de temperaturas actual es posteriormente calculado para las siguientes relaciones. En el primer efecto tenemos:

$$T_1 = T_s - \Delta T_1 \quad (4.17)$$

Y para los efectos 2 a n tenemos:

$$T_i = T_{i-1} - \Delta T_1 \frac{U_1}{U_i} \quad (4.18)$$

El cálculo para el perfil de temperaturas de las expresiones 4.17 y 4.18 requiere la especificación de los coeficientes globales de transferencia de calor, U_i .

4.4 PERFILES DE CONCENTRACIÓN DE SAL, CAUDAL DE SALMUERA Y DESTILADO.

Los caudales de destilado son obtenidos de los siguientes balances y las cargas térmicas, expresión 4.6, de la siguiente manera:

$$\dot{m}_d = D_1 + D_2 + \dots + D_{i-1} + D_n \quad (4.19)$$

$$D_i \lambda_{vi} = D_{i-1} \lambda_{vi-1} \quad (4.20)$$

Para los efectos 2 a n.

La expresión 4.20 es usada para expresar los valores de D_i (para $i = 2$ a n) en términos de D_1 , donde:

$$D_2 = D_1 \frac{\lambda_{v1}}{\lambda_{v2}}$$

Y

$$D_3 = D_2 \frac{\lambda_{v2}}{\lambda_{v3}} = D_1 \left(\frac{\lambda_{v1}}{\lambda_{v2}} \right) \left(\frac{\lambda_{v2}}{\lambda_{v3}} \right) = D_1 \frac{\lambda_{v1}}{\lambda_{v3}}$$

Una fórmula general recursiva llega a:

$$D_i = D_1 \frac{\lambda_{v1}}{\lambda_{vi}} \quad \text{con } i = 2 \text{ a } n \quad (4.21)$$

Substituyendo la expresión 4.21 en la expresión 4.19 tenemos:

$$\dot{m}_d = D_1 + D_1 \frac{\lambda_{v1}}{\lambda_{v2}} + \dots + D_1 \frac{\lambda_{v1}}{\lambda_{vn-1}} + D_1 \frac{\lambda_{v1}}{\lambda_{vn}} \quad (4.22)$$

La expresión 4.21 es posteriormente reescrita para obtener una expresión para D_1 de la siguiente manera:

$$D_1 = \frac{\dot{m}_d}{\lambda_{v1} \left(\frac{1}{\lambda_{v1}} + \frac{1}{\lambda_{v2}} + \dots + \frac{1}{\lambda_{vn-1}} + \frac{1}{\lambda_{vn}} \right)} \quad (4.23)$$

La fórmula recursiva de la expresión 4.21 es posteriormente usada para obtener el caudal de destilado en otros efectos:

$$D_2 = D_1 \left(\frac{\lambda_{v1}}{\lambda_{v2}} \right)$$

$$D_3 = D_1 \left(\frac{\lambda_{v1}}{\lambda_{v3}} \right)$$

$$D_n = D_1 \left(\frac{\lambda_{v1}}{\lambda_{vn}} \right)$$

El caudal de salmuera en el primer efecto puede ser obtenido de:

$$B_1 = \dot{m}_f - D_1 \quad (4.24)$$

En los efectos 2 a n , esto es dado por:

$$B_i = B_{i-1} - D_i \quad (4.25)$$

Balances de sal similares en el primer efecto y en los efectos 2 a n son escritos para obtener X_1 , X_2 a X_n de la siguiente manera:

$$X_1 = X_f \left(\frac{\dot{m}_f}{B_1} \right) \quad (4.26)$$

$$X_i = X_{i-1} \left(\frac{B_{i-1}}{B_i} \right) \quad (4.27)$$

4.5 ÁREA DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Las áreas de transferencia de calor en los efectos 1 a n deben ser calculadas para confirmar la hipótesis básica del modelo, es decir, las áreas de transferencia de calor serán iguales. El área de transferencia de calor en el primer efecto es dada por:

$$A_1 = \frac{D_1 \lambda_{v1}}{U_1 (T_s - T_1)} \quad (4.28)$$

Y para los efectos 2 a n está dado por:

$$A_i = \frac{D_i \lambda_{vi}}{U_i (T_i - \Delta T_{\text{pérdidas}})} \quad (4.29)$$

La $\Delta T_{\text{pérdidas}}$ de la expresión anterior corresponde a las pérdidas termodinámicas en cada efecto y su valor podría variar de 0.5 - 3 [°C], [Foust y Wenzel, 1997].

4.6 CRITERIO DE CONVERGENCIA Y ARREGLO PARA UNA NUEVA ITERACIÓN

El criterio de convergencia es basado en la máxima diferencia en las áreas de transferencia de calor. Esto es dado por:

$$\Delta A_{\text{máx}} = \text{Máx} (A_{i+1} - A_i), \text{ con } i = 1, n - 1 \quad (4.30)$$

Si $\Delta A_{\text{máx}}$ es mejor que la tolerancia específica de iteración, entonces las iteraciones continuarán. La tolerancia de iteración podría ser especificada como un número grande, es decir, 1 [m²], si un número pequeño de iteraciones (1 ó 2) son necesarias. Sin embargo, si es requerida gran exactitud, entonces una tolerancia más pequeña es especificada, es decir, 0.1 ó 0.001 [m²].

Si el error es mayor que la tolerancia, entonces una nueva estimación para ΔT_i es hecha:

$$\Delta T_i = \Delta T_i \frac{A_i}{A_m} \quad (4.31)$$

Donde, A_m , es el área promedio de transferencia de calor y es obtenida de:

$$A_m = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{n} \quad (4.32)$$

Las iteraciones continúan calculando lo siguiente:

- El perfil de temperatura, T_i , en los efectos 1 a n de las expresiones 4.17 a 4.19.
- El caudal de destilado en el primer efecto, D_1 , expresión 4.23.
- El caudal de destilado en los efectos 2 a n, D_i , expresión 4.21.
- El caudal de salmuera en el primer efecto, B_1 , expresión 4.24.
- El caudal de salmuera en los efectos 2 a n, B_i , expresión 4.25.

- La concentración de sal en el primer efecto, X_1 , expresión 4.26.
- La concentración de sal en los efectos 2 a n, X_i , expresión 4.27.
- El área de transferencia de calor en los efectos 1 a n, A_i , ecuaciones 4.28 y 4.29.

El criterio de convergencia, expresión 4.30, es posteriormente confirmado y las iteraciones continúan hasta que esto es logrado. Alcanzar la solución final es seguido por el cálculo de las características de rendimiento del sistema, es decir, rendimiento, área de transferencia de calor y el caudal específico del agua de enfriamiento.

4.7 PARÁMETROS DE RENDIMIENTO

El rendimiento, PR, es definido como la relación del caudal de destilado (\dot{m}_d) y el vapor vivo (\dot{m}_s). Esto es:

$$PR = \frac{\dot{m}_d}{\dot{m}_s} \quad (4.33)$$

El gasto másico del vapor, \dot{m}_s , es obtenido de la suposición de las cargas térmica iguales, donde:

$$\dot{m}_s = D_1 \frac{\lambda_{v1}}{\lambda_s} \quad (4.34)$$

El área específica de transferencia de calor es:

$$SA = \frac{\sum_{i=1}^n A_i + A_c}{\dot{m}_d} \quad (4.35)$$

Donde A_i es el área de transferencia de calor en el efecto i y A_c es el área de transferencia de calor del condensador, la cual es obtenida de:

$$A_c = \frac{\dot{Q}_c}{U_c (LMTD)_c} \quad (4.36)$$

$(LMTD)_c$ es definida como:

$$(LMTD)_c = \frac{T_f - T_{cw}}{\ln \frac{T_n - T_{cw}}{T_n - T_f}} \quad (4.37)$$

Donde T_{wc} es la temperatura de la toma del agua de mar, T_f , es la temperatura de salida agua de mar, y T_n es la temperatura de condensación de vapor formado en el último efecto. La carga térmica del condensador es calculada de:

$$\dot{Q}_c = D_n \lambda_{vn} \quad (4.38)$$

El gasto másico del agua de enfriamiento específico es definido como:

$$s\dot{m}_{cw} = \frac{\dot{m}_d}{\dot{m}_{cw}} \quad (4.39)$$

Donde \dot{m}_{cw} es el caudal del agua de enfriamiento y es obtenido del balance de energía del condensador:

$$D_n \lambda_{vn} = (\dot{m}_f + \dot{m}_{cw}) C_p (T_f - T_{cw}) \quad (4.40)$$

Debe notarse que T_f es la temperatura del agua de mar de alimentación entrando al precalentador asociado al efecto n-1.

4.8 BALANCES DE MASA Y ENERGÍA NUMÉRICOS

El modelo siguiente es utilizado para determinar el comportamiento del proceso EME de cinco efectos.

Las especificaciones siguientes son hechas para resolver el modelo, (tabla 4.2):

Especificaciones	Valor
Número de efectos [n]	5
Temperatura de vapor [T_s]	100 [°C]
Concentración de alimentación [X_f]	35,000 [ppm]
Concentración de salmuera [$X_{salmuera}$]	70,000 [ppm]
Temperatura en el efecto 5 [T_5]	40 [°C]
Perdidas en cada efecto [$\Delta T_{pérdidas}$]	2 [°C]
Caudal de destilado [\dot{m}_d]	1 [kg/s]

Tabla 4.2. Especificaciones.

Antes de iniciar las iteraciones, el calor latente de vapor saturado y el vapor formado en el último efecto son obtenidos de tablas de vapor o de la correlación dada en la siguiente expresión, [Hisham, 2002]:

$$\lambda = 2501.897140 - 2.407064037T + 1.192217X10^{-3} T^2 - 1.5863X10^{-5}T^3 \quad (4.41)$$

Paso 1: cálculo del calor latente del vapor saturado y del vapor formado en el último efecto.

$$\lambda_s = 2257.250 \text{ [kJ/kg]}$$

$$\lambda_{v5} = 2406.507 \text{ [kJ/kg]}$$

El flujo de salmuera que sale del último efecto (efecto 5) y la alimentación de agua de mar son obtenidos de la siguiente expresión:

$$B_5 = \left(\frac{X_f}{X_5 - X_f} \right) \dot{m}_d = \frac{35,000 \text{ [ppm]}}{70,000 \text{ [ppm]} - 35,000 \text{ [ppm]}} \left(1 \frac{\text{[kg]}}{\text{[s]}} \right) = 1 \frac{\text{[kg]}}{\text{[s]}} \quad (4.42)$$

Posteriormente el gasto másico de alimentación, \dot{m}_f , es igual a la suma de \dot{m}_d y B_5 :

$$\dot{m}_f = 1 \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right] + 1 \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right] = 2 \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$$

La caída total de temperatura a través de los efectos, $T_s - T_5$, es igual a $100 \text{ [}^\circ\text{C]} - 40 \text{ [}^\circ\text{C]} = 60 \text{ [}^\circ\text{C]}$. Los coeficientes de transferencia de calor en los efectos 1 a 5 son especificados y supuestos para permanecer constantes en las iteraciones. El coeficiente de transferencia de calor en el primer efecto, U_1 , es establecido como $2.4 \text{ [kW/m}^2\text{ }^\circ\text{C]}$, [Hisham, 2002]. Los valores de los efectos subsiguientes son obtenidos de la expresión siguiente:

$$U_{i+1} = 0.95 U_i \quad (4.43)$$

Los valores de los coeficientes de transferencia de calor para cada efecto son resumidos a continuación (tabla 4.3):

Coeficiente de transferencia de calor	[kW/m ² °C]
U₁	2.4
U₂	2.28
U₃	2.17
U₄	2.06
U₅	1.95

Tabla 4.3. Coeficientes de transferencia de calor en cada efecto.

La suma de los coeficientes de calor inversos se requiere para calcular la caída de temperatura para cada efecto. Esta suma es:

$$\frac{1}{\sum_{i=1}^n U_i} = \frac{1}{U_1} + \frac{1}{U_2} + \frac{1}{U_3} + \frac{1}{U_4} + \frac{1}{U_5} = \frac{1}{2.4} + \frac{1}{2.28} + \frac{1}{2.17} + \frac{1}{2.06} + \frac{1}{1.95} = 2.31 \left[\frac{\text{m}^2\text{ }^\circ\text{C}}{\text{kW}} \right] \quad (4.44)$$

La caída de temperatura en el primer efecto es posteriormente calculada:

$$\Delta T_1 = \frac{\Delta T_t}{U_1 \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{U_i} \right)} = \frac{60 \text{ [}^\circ\text{C]}}{\left(2.4 \left[\frac{\text{kW}}{\text{m}^2\text{ }^\circ\text{C}} \right] \right) \left(2.31 \left[\frac{\text{m}^2\text{ }^\circ\text{C}}{\text{kW}} \right] \right)} = 10.802 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (4.45)$$

Los valores de ΔT_i son calculados para los efectos 2 al 5 de la manera siguiente:

$$\Delta T_2 = \Delta T_1 \left(\frac{U_1}{U_2} \right) = 11.370 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (4.46)$$

$$\Delta T_3 = \Delta T_1 \left(\frac{U_1}{U_3} \right) = 11.968 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (4.47)$$

$$\Delta T_4 = \Delta T_1 \left(\frac{U_1}{U_4} \right) = 12.598 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (4.48)$$

$$\Delta T_5 = \Delta T_1 \left(\frac{U_1}{U_5} \right) = 13.261 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (4.49)$$

Es importante señalar que las caídas de temperatura por cada efecto se incrementan cuando la temperatura del efecto es reducida, es decir, $\Delta T_1 > \Delta T_2 > \Delta T_3 > \Delta T_4 > \Delta T_5$.

Esto es consecuencia de las siguientes razones:

- Área de transferencia de calor constante.
- Coeficiente de transferencia de calor pequeño a bajas temperaturas.
- Cargas térmicas constantes en todos los efectos.

Sin embargo, el incremento de la caída de temperatura a bajas temperaturas compensa el decremento en los coeficientes de transferencia de calor.

Los perfiles de temperaturas en los efectos 1 a 5 son posteriormente calculados:

$$T_1 = T_s - \Delta T_1 = 89.20 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (4.46)$$

$$T_2 = T_1 - \Delta T_1 \left(\frac{U_1}{U_2} \right) = 77.83 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (4.47)$$

$$T_3 = T_2 - \Delta T_1 \left(\frac{U_1}{U_3} \right) = 65.86 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (4.48)$$

$$T_4 = T_3 - \Delta T_1 \left(\frac{U_1}{U_4} \right) = 53.26 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (4.49)$$

Para confirmar los valores anteriores T_5 es calculado de la siguiente forma:

$$T_5 = T_4 - \Delta T_1 \left(\frac{U_1}{U_5} \right) = 40 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (4.50)$$

Este valor coincide con la especificación inicial para el efecto 5

Las magnitudes de los calores latentes de vaporización en todos los efectos se calculan usando la expresión 4.41, [Hisham, 2002].

El valor del calor latente en el efecto 5 se calculó previamente, y su valor es igual a 2, 406.507 [kJ/kg]. Un resumen de los valores de los calores latentes es dado en la tabla 4.4:

Calor latente	[kJ/kg]
λ_{v1}	2285.42
λ_{v2}	2314.30
λ_{v3}	2344.01
λ_{v4}	2374.68
λ_{v5}	2406.50
λ_{vs}	2257.25

Tabla 4.4. Calor latente.

Los perfiles de destilado y salmuera así como las concentraciones de salmuera son calculados de las siguientes ecuaciones:

$$D_1 = \frac{\dot{m}_d}{\left(1 + \frac{\lambda_{v1}}{\lambda_{v2}} + \frac{\lambda_{v1}}{\lambda_{v3}} + \frac{\lambda_{v1}}{\lambda_{v4}} + \frac{\lambda_{v1}}{\lambda_{v5}}\right)} = 0.2050 \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right] \quad (4.51)$$

Posteriormente, el caudal de destilado en los efectos 2 a n se calcula de la siguiente manera:

$$D_2 = \frac{D_1 \lambda_{v1}}{\lambda_{v2}} = 0.2026 \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right] \quad (4.52)$$

$$D_3 = \frac{D_1 \lambda_{v1}}{\lambda_{v3}} = 0.2000 \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right] \quad (4.53)$$

$$D_4 = \frac{D_1 \lambda_{v1}}{\lambda_{v4}} = 0.1974 \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right] \quad (4.54)$$

$$D_5 = \frac{D_1 \lambda_{v1}}{\lambda_{v5}} = 0.1948 \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right] \quad (4.55)$$

Los caudales de salmuera son obtenidos de las expresiones siguientes:

$$B_1 = \dot{m}_f - D_1 = 1.7949 \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right] \quad (4.56)$$

$$B_2 = B_1 - D_2 = 1.5923 \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right] \quad (4.57)$$

$$B_3 = B_2 - D_3 = 1.3923 \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right] \quad (4.58)$$

$$B_4 = B_3 - D_4 = 1.1948 \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right] \quad (4.59)$$

Los cálculos anteriores son autenticados mediante la determinación del valor de B_5 :

$$B_5 = B_4 - D_5 = 1 \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right] \quad (4.60)$$

Este valor coincide con los cálculos del balance de masa inicial.

El perfil de concentración de sal es calculado de las siguientes expresiones:

$$X_1 = \frac{X_f \dot{m}_f}{B_1} = 39,000.35 \text{ [ppm]} \quad (4.61)$$

$$X_2 = \frac{X_1 B_1}{B_2} = 43,962.34 \text{ [ppm]} \quad (4.62)$$

$$X_3 = \frac{X_2 B_2}{B_3} = 50,278.14 \text{ [ppm]} \quad (4.63)$$

$$X_4 = \frac{X_3 B_3}{B_4} = 58,586.13 \text{ [ppm]} \quad (4.64)$$

El valor de X_5 es especificado en los parámetros iniciales del problema de 70,000 [ppm].

Las áreas de transferencia de calor se calculan para los efectos 1 a 5. Estos valores son:

$$A_1 = \frac{D_1 \lambda_{v1}}{(U_1(T_s - T_1))} = 18.08 \text{ [m}^2\text{]} \quad (4.65)$$

$$A_2 = \frac{D_2 \lambda_{v2}}{(U_2(\Delta T_2 - \Delta T_{\text{perdidas}}))} = 21.94 \text{ [m}^2\text{]} \quad (4.66)$$

$$A_3 = \frac{D_3 \lambda_{v3}}{(U_3(\Delta T_3 - \Delta T_{\text{perdidas}}))} = 21.71 \text{ [m}^2\text{]} \quad (4.67)$$

$$A_4 = \frac{D_4 \lambda_{v4}}{(U_4(\Delta T_4 - \Delta T_{\text{perdidas}}))} = 21.49 \text{ [m}^2\text{]} \quad (4.68)$$

$$A_5 = \frac{D_5 \lambda_{v5}}{(U_5(\Delta T_5 - \Delta T_{\text{perdidas}}))} = 21.29 \text{ [m}^2\text{]} \quad (4.69)$$

La máxima diferencia en las áreas de los efectos es igual a 0.35 [m²]. Suponiendo que se requiere un error de menos de 0.0001 [m²], entonces, se debe llevar a cabo una nueva serie de iteraciones. La segunda iteración inicia con el cálculo de las nuevas áreas de transferencia de calor:

$$A_m = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{n} = 20.91 \text{ [m}^2\text{]} \quad (4.70)$$

Un nuevo perfil de caída de temperatura a través de los efectos es calculado posteriormente. Un total de 6 iteraciones fue necesario, obteniendo los valores siguientes, los cuales son tomados como definitivos (tabla 4.5):

Efecto	1	2	3	4	5
D [kg/s]	0.2048	0.2026	0.2003	0.1980	0.1942
B [kg/s]	1.7952	1.5926	1.3923	1.1942	1
X [ppm]	38,993.55	43,953.77	50,278.02	58,615.67	70,000
T [°C]	90.59	80.68	70.25	59.27	47.42
A [m ²]	20.6913	20.6914	20.6913	20.6915	20.6914

Tabla 4.5. Valores obtenidos.

Finalmente, se calculan los parámetros de rendimiento del sistema. Para obtener el rendimiento es necesario determinar el gasto másico del vapor saturado, donde:

$$\dot{m}_d = D_1 \frac{\lambda_{v1}}{\lambda_s} = 0.2071 \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right] \quad (4.71)$$

Debido a que el destilado es igual a 1 [kg/s], tenemos que:

$$PR = \frac{\dot{m}_d}{\dot{m}_s} = 4.83 \left[\frac{\text{kg evaporados}}{\text{kg de vapor saturado}} \right] \quad (4.72)$$

Este resultado es muy significativo, y coherente con el proceso EME práctico, donde el rendimiento es aproximadamente igual al número de efectos $n=5$.

4.8.1 Análisis del Condensador

La carga térmica del condensador es calculada de la siguiente expresión:

$$\dot{Q}_c = D_5 \lambda_{v5} = 467.34 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right] \quad (4.73)$$

El significado logarítmico de la diferencia de temperatura en el condensador es dado por:

$$(\text{LMTD})_c = \frac{(T_f - T_{cw})}{\ln\left(\frac{T_5 - \Delta T_{\text{pérdidas}} - T_{cw}}{T_5 - \Delta T_{\text{pérdidas}} - T_f}\right)} = 16.249 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (4.74)$$

El área de transferencia de calor en el condensador se calcula de la siguiente manera:

$$A_c = \frac{\dot{Q}_c}{(U_c(\text{LMTD})_c)} = 15.489 \text{ [m}^2\text{]} \quad (4.75)$$

El área específica de transferencia de calor es calculada mediante la suma de las áreas de transferencia de calor de los 5 efectos y la del condensador:

$$sA = \frac{\sum_{i=1}^n A_i + A_c}{\dot{m}_d} = \frac{118.95 \text{ [m}^2\text{]}}{1 \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]} = 118.95 \left[\frac{\text{m}^2 \text{ s}}{\text{kg}} \right] \quad (4.76)$$

El gasto másico del agua de enfriamiento es obtenido de la siguiente ecuación:

$$D_5 \lambda_{v5} = (\dot{m}_f + \dot{m}_{cw}) C_p (T_f - T_{cw}) \quad (4.77)$$

Despejando de esta ecuación nuestra única incógnita, \dot{m}_{cw} , obtenemos su valor, el cual resulta:

$$\dot{m}_{cw} = 14.69 \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$$

El gasto másico específico del agua de enfriamiento tiene la misma magnitud debido a que el gasto másico del producto total es igual a 1 [kg/s].

NOMENCLATURA CAPÍTULO 4

- Alfabeto convencional

A – (Área de transferencia de calor) [m²]
A₁ – (Área de transferencia de calor del efecto 1) [m²]
A₂ – (Área de transferencia de calor del efecto 2) [m²]
A₃ – (Área de transferencia de calor del efecto 3) [m²]
A₄ – (Área de transferencia de calor del efecto 4) [m²]
A₅ – (Área de transferencia de calor del efecto 5) [m²]
A_c – (Área de transferencia de calor del condensador) [m²]
A_m – (Área de transferencia de calor promedio) [m²]
sA – (Área específica de transferencia de calor) [m² s/kg]
Q̇₁ – (Calor transmitido en el efecto 1) [kJ/kg]
Q̇₂ – (Calor transmitido en el efecto 2) [kJ/kg]
Q̇₃ – (Calor transmitido en el efecto 3) [kJ/kg]
Q̇₄ – (Calor transmitido en el efecto 4) [kJ/kg]
Q̇₅ – (Calor transmitido en el efecto 5) [kJ/kg]
Q̇_n – (Calor transmitido en el efecto n) [kJ/kg]
Q̇_c – (Carga térmica del condensador) [kJ/kg]
ṁ_d – (Caudal total de destilado) [kg/s]
ṁ_{cw} – (Caudal de agua de enfriamiento en el condensador) [kg/s]
D₁ – (Caudal de destilado en el efecto 1) [kg/s]
D₂ – (Caudal de destilado en el efecto 2) [kg/s]
D₃ – (Caudal de destilado en el efecto 3) [kg/s]
D₄ – (Caudal de destilado en el efecto 4) [kg/s]
D₅ – (Caudal de destilado en el efecto 5) [kg/s]
D_n – (Caudal de destilado en el efecto n) [kg/s]
B₁ – (Caudal de salmuera en el efecto 1) [kg/s]
B₂ – (Caudal de salmuera en el efecto 2) [kg/s]
B₃ – (Caudal de salmuera en el efecto 3) [kg/s]
B₄ – (Caudal de salmuera en el efecto 4) [kg/s]
B₅ – (Caudal de salmuera en el efecto 5) [kg/s]
B_n – (Caudal de salmuera en el efecto n) [kg/s]
C_p – (Coeficiente de capacidad térmica específica) [kJ/kg °C]
U₁ – (Coeficiente de transferencia de calor en el efecto 1) [kW/m²°C]
U₂ – (Coeficiente de transferencia de calor en el efecto 2) [kW/m²°C]
U₃ – (Coeficiente de transferencia de calor en el efecto 3) [kW/m²°C]
U₄ – (Coeficiente de transferencia de calor en el efecto 4) [kW/m²°C]
U₅ – (Coeficiente de transferencia de calor en el efecto 5) [kW/m²°C]
U_n – (Coeficiente de transferencia de calor en el efecto n) [kW/m²°C]
X_f – (Concentración de sal en el flujo de alimentación) [ppm]
X₁ – (Concentración de sal en el flujo de salmuera del efecto 1) [ppm]
X₂ – (Concentración de sal en el flujo de salmuera del efecto 2) [ppm]
X₃ – (Concentración de sal en el flujo de salmuera del efecto 3) [ppm]
X₄ – (Concentración de sal en el flujo de salmuera del efecto 4) [ppm]

X_5 – (Concentración de sal en el flujo de salmuera del efecto 5) [ppm]
 X_n – (Concentración de sal en el flujo de salmuera del efecto n) [ppm]
 LMTD – (Diferencia media logarítmica térmica) [°C]
 $(LMTD)_c$ – (Diferencia media logarítmica térmica en el condensador) [°C]
 \dot{m}_{cw} – (Gasto másico de agua de enfriamiento específico)
 \dot{m}_f – (Gasto másico de alimentación) [kg/s]
 \dot{m}_s – (Gasto másico de vapor vivo) [kg/s]
 PR – (Rendimiento)
 T_5 – (Temperatura de vapor saturado) [°C]
 T_1 – (Temperatura en el efecto 1) [°C]
 T_2 – (Temperatura en el efecto 2) [°C]
 T_3 – (Temperatura en el efecto 3) [°C]
 T_4 – (Temperatura en el efecto 4) [°C]
 T_5 – (Temperatura en el efecto 5) [°C]
 T_n – (Temperatura en el efecto n) [°C]
 T_{wc} – (Temperatura de agua de enfriamiento que sale del condensador) [°C]
 T_f – (Temperatura de agua de enfriamiento que entra al condensador) [°C]

- Símbolos griegos

ΔT_1 – (Caída de temperatura en el efecto 1) [°C]
 ΔT_2 – (Caída de temperatura en el efecto 2) [°C]
 ΔT_3 – (Caída de temperatura en el efecto 3) [°C]
 ΔT_4 – (Caída de temperatura en el efecto 4) [°C]
 ΔT_5 – (Caída de temperatura en el efecto 5) [°C]
 ΔT_n – (Caída de temperatura en el efecto n) [°C]
 $\Delta T_{pérdidas}$ – (Caída de temperatura por pérdidas) [°C]
 λ – (Calor latente de vaporización) [kJ/kg]
 λ_s – (Calor latente del vapor saturado) [kJ/kg]
 λ_{v1} – (Calor latente en el efecto 1) [kJ/kg]
 λ_{v2} – (Calor latente en el efecto 2) [kJ/kg]
 λ_{v3} – (Calor latente en el efecto 3) [kJ/kg]
 λ_{v4} – (Calor latente en el efecto 4) [kJ/kg]
 λ_{v5} – (Calor latente en el efecto 5) [kJ/kg]
 $\Delta A_{máx}$ – (Máxima diferencia en las áreas de transferencia de calor) [m²]
 ΔT – (Total de la caída de temperatura a través de los efectos) [°C]

5

DINÁMICA OPERATIVA DE LOS PROCESOS

5.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se lleva a cabo la dinámica operativa de los procesos tomando como referencia lo definido en capítulos anteriores. Se trabaja con una planta de EME con una capacidad de 1,000 [m³/día]. Se conoce de antemano que se requiere agua salada, sal y buenos niveles de radiación por lo que se escogerá un lugar adecuado de la República Mexicana para instalar la planta (La Pas, BCS). Por lo tanto, se obtendrá la carga térmica proporcionada por el estanque solar, el gasto másico de la salmuera caliente extraída del estanque solar, el área de captación teórica del estanque solar, así como el flujo volumétrico y volumen inicial de llenado del mismo.

5.2 CÁLCULO DE CARGA TÉRMICA

Mediante los cálculos realizados en los balances de masa y energía previos a este capítulo se conocerá la carga térmica, proporcionada por el estanque solar.

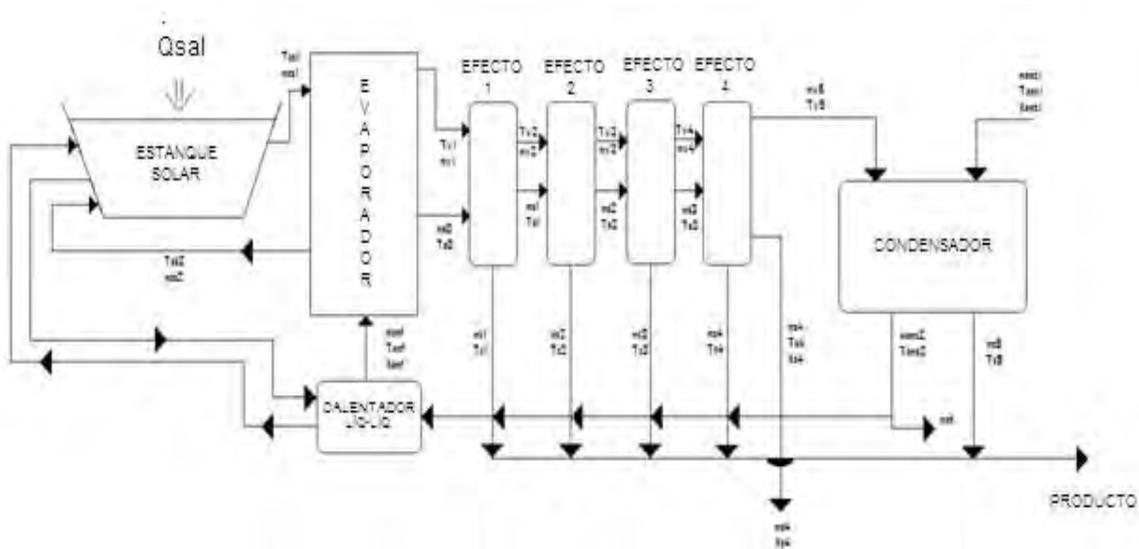


Figura 5.1. Dinámica operativa de los procesos.

- Carga térmica.

$$\dot{Q}_{es} = \dot{m}_{es} C_p \Delta T \quad (5.1)$$

$$\dot{Q}_{es} = D_{es} \lambda_{es} = \left(2.315 \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right] \right) \left(2,358 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right] \right) \quad (5.2)$$

$$\dot{Q}_{es} = 5,458.77 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{s}} \right] = 5.46 \text{ [MW]}$$

Donde:

D_{es} = evaporación en cada efecto, [kg/s]

λ_{es} = calor latente de ebullición a 60 [°C], [kJ/kg]

\dot{m}_{es} = gasto másico de la salmuera caliente extraída del estanque solar, [kg/s]

ΔT = diferencia de temperatura, [°C]

Igualando las expresiones 5.1 y 5.2, tenemos:

$$\dot{Q}_{es} = \dot{m}_{es} C_p \Delta T = 5,458,770 \text{ [W]} \quad (5.3)$$

Suponiendo una ΔT de 10 [°C] y una C_p de 4 [kJ/kg °C], despejando \dot{m} de la expresión 5.3 se tiene:

$$\dot{m}_{es} = \frac{5458.77 \text{ [kW]}}{\left(4 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{°C}} \right] \right) (10 \text{ °C})} \quad (5.4)$$

$$\dot{m}_{es} = 136.47 \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$$

5.3 ÁREA TEÓRICA DE CAPTACIÓN DEL ESTANQUE SOLAR

Tomando como sitio de instalación a La Paz, BCS y en las condiciones de operación más adversas se estima que se aprovecharían 9.6 [W/m²] [Almanza y Muñoz, 2003]. Como se mencionó al principio de este capítulo, nuestra planta de EME tiene una capacidad de 1,000 [m³/día]=11.574 [kg/s], la cual requiere un gasto másico de agua de mar de lo doble, es decir, 2000 [m³/día]=23.15 [kg/s] y con una diferencia de temperatura de 10 [°C] y una evaporación de 2.315 [kg/s] por cada efecto.

Como la potencia media anual es 9.6 [W/m²] la cual se toma como valor de \dot{Q} para La Paz, BCS, y que fue descrita en el capítulo 2, haciendo la relación correspondiente tenemos:

$$9.6 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right] * A_{teó} = 5,458.77 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{s}} \right] = 5458.77 \times 10^3 \left[\frac{\text{J}}{\text{s}} \right] \quad (5.5)$$

$$A_{teó} = 568,621.875 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$A_{teó} = 56.86 \text{ [ha]}$$

Se tiene entonces que el área de captación sería $A_{teó} = 56.86 \text{ [ha]}$

5.4 EVAPORACIÓN

Como es sabido, la zona convectiva superior requiere que el agua que se evapora sea repuesta. Dentro de las posibilidades que existen para llevar a cabo esta reposición, se puede usar agua

pura, salobre o agua de mar. Suponiendo una evaporación (F) de 2.5 [m³/m² año] [Muñoz, 2008], se puede calcular el valor de flujo volumétrico de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}\dot{v}_{\text{vol(ZCS)}} &= A_{\text{teó}} * F & (5.6) \\ \dot{v}_{\text{vol(ZCS)}} &= (568,621.875 \text{ [m}^2\text{)}) \left(2.5 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \text{ año}}\right]\right) \\ \dot{v}_{\text{vol(ZCS)}} &= 1,421,554.69 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{año}}\right]\end{aligned}$$

5.5 SALMUERA CONCENTRADA

De igual manera la zona inferior requiere que se reponga la sal que se difunde hacia la superficie, debido al fenómeno de difusión; aproximadamente se requiere reponer 20 [kg/m² año] de sal a partir de salmuera con una concentración de 25 % masa, y una densidad de 1.2 [g/cm³], [Muñoz, 2008].

Por lo tanto, considerando lo anterior tenemos, que la cantidad de salmuera requerida es:

$$S = \left(20 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{ año}}\right]\right) (4) = 80 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{ año}}\right] = 0.0667 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \text{ año}}\right] \quad (5.7)$$

Lo que nos produce un flujo volumétrico de:

$$\begin{aligned}\dot{v}_{\text{vol(INF)}} &= A * S & (5.8) \\ \dot{v}_{\text{vol(INF)}} &= (568,621.875 \text{ [m}^2\text{)}) \left(0.0667 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \text{ año}}\right]\right) \\ \dot{v}_{\text{vol(INF)}} &= 37,529 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{año}}\right]\end{aligned}$$

El volumen inicial para el llenado del estanque, (v_{ini}), sería, suponiendo una profundidad de 3 [m], de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}v_{\text{ini}} &= A * h & (5.9) \\ v_{\text{ini}} &= (568,621.875 \text{ [m}^2\text{)})(3 \text{ [m]}) \\ v_{\text{ini}} &= 1,705,865.63 \text{ [m}^3\text{]}\end{aligned}$$

5.6 CUIDADOS ESPECIALES

Se requiere tomar medidas en la operación para evitar el crecimiento de algas, controlar la corrosión, impedir la extracción de calor, es decir la salmuera caliente y evitar el mezclado por la acción del viento.

Los resultados permiten observar que las perspectivas para el proceso, como captador y almacén de energía, en el país, son atractivas, ya que el estanque se mantiene en niveles adecuados de temperatura, aun en las condiciones más adversas.

5.7 TABLA DE RESULTADOS

\dot{Q}_{es} [MW]	5.46
\dot{m}_{es} [kg/s]	136.47
$A_{teó}$ [ha]	56.86
$\dot{v}_{vol(ZCS)}$ [m ³ /año]	1,241, 554
S [m ³ /m ² año]	0.0667
$\dot{v}_{vol(INF)}$ [m ³ /año]	37,529
\dot{v}_{ini} [m ³]	1,705,865

Tabla 5.1. Resultados.

NOMENCLATURA CAPÍTULO 5

- Alfabeto convencional

$A_{teó}$ - (Área teórica de captación del estanque solar) [m^2]

S - (Cantidad de salmuera requerida) [$m^3/m^2año$]

\dot{Q}_{es} - (Carga térmica proporcionada por el estanque solar) [W]

C_p - (Coeficiente de capacidad térmica específica) [kJ/kg °C]

ΔT - (Diferencia de temperatura) [°C]

F - (Evaporación) [$m^3/m^2año$]

\dot{m}_{es} - (Gasto másico de la salmuera caliente extraída del estanque solar) [kg/s]

- Símbolos griegos

λ_{es} - (Calor latente de evaporación) [kJ/kg]

$\dot{u}_{vol(ZCS)}$ - (Cantidad de salmuera diluida que se requiere reponer en la zona convectiva superior) [$m^3/año$]

$\dot{u}_{vol(INF)}$ - (Cantidad de salmuera que se requiere reponer en la zona inferior) [$m^3/año$]

u_{ini} - (Volumen inicial para el llenado del estanque solar) [m^3]

6

ACOPLAMIENTO DE LOS PROCESOS

6.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se realiza el acoplamiento de los procesos de una planta desaladora que usa un estanque solar como fuente de energía; es decir, se unen al estanque solar, el evaporador, la planta de desalación de EME, el condensador externo y el calentador líquido-líquido, con el fin de obtener el funcionamiento en conjunto del proceso.

Inicialmente tomaremos el estanque solar del cual extraeremos salmuera caliente, que va a un evaporador para aprovechar su energía; una vez que la salmuera caliente ha cedido calor se regresará al estanque solar, el evaporador recibirá agua de mar calentada por el condensador externo, los condensadores de cada efecto y el calentador líquido-líquido.

Dentro de dicho evaporador y como consecuencia del intercambio de calor entre los fluidos antes mencionados se producirá la ebullición nucleada de pileta o “pool-boiling”, generando vapor y agua de mar concentrada y caliente.

En el siguiente paso tenemos la planta desaladora de EME, la cual consta de 4 efectos: el primer efecto será alimentado por el vapor y el agua caliente generada en el evaporador. Este primer efecto producirá un condensado que servirá para calentar el agua de mar, y de igual manera un vapor y agua de mar con mayor concentración y con menor temperatura, que será alimentada al efecto 2, repitiéndose el proceso de manera sucesiva, en los efectos posteriores.

El último componente del proceso es el condensador externo, el cual es alimentado por el vapor producido en el último efecto y por agua de mar cruda (fluido frío). Los condensados de cada efecto y del condensador serán el producto total de la instalación.

6.2 ESTANQUE SOLAR

El primer elemento de este acoplamiento de procesos es el estanque solar. Como se mencionó anteriormente, un estanque solar es un dispositivo muy efectivo, ya que este puede estar operando las 24 horas del día, sin afectarle de manera significativa efectos externos tanto naturales como físicos, como los días nublados, lluvias, etc.

Es importante señalar que la carga térmica que el estanque solar generará es 5.46 [MW], esto con base en análisis previos, además de que el gasto másico de la salmuera caliente extraída del estanque solar es igual a 136.47 [kg/s].

Finalmente, el punto más relevante a considerar de este estanque solar es la temperatura de salmuera que vamos a tomar del estanque para alimentar al evaporador, siendo que para nuestro análisis tomaremos un valor de 75 [°C].

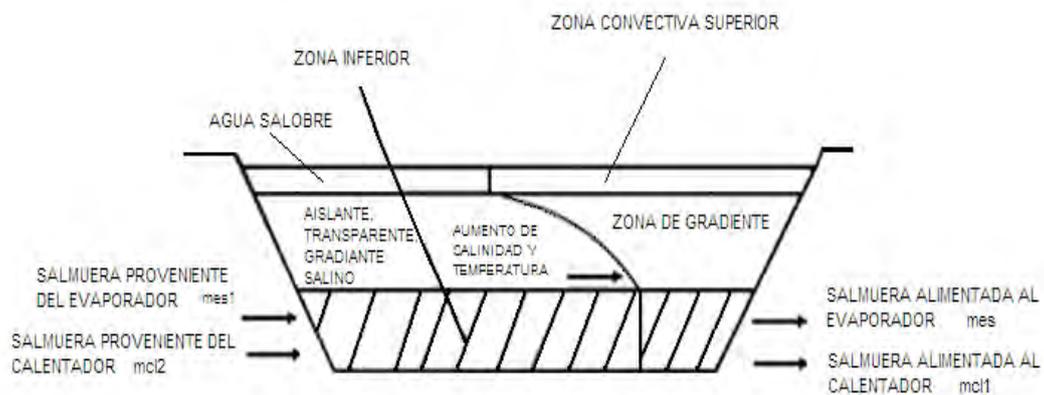


Fig. 6.1. Estanque solar.

6.3 EVAPORADOR

La segunda etapa del proceso ocurre en el evaporador; dicho evaporador es alimentado por dos fuentes, la primera es la salmuera caliente extraída del estanque solar, la cual, como se ha mencionado para fines prácticos será considerada como 75 [°C], (siendo el valor alcanzado más usual en la práctica) y la cual después de pasar por el evaporador cediendo calor, regresará al estanque solar para volver a calentarse. La segunda fuente de alimentación que recibe este evaporador es agua de mar caliente; como consecuencia del intercambio de calor entre estos fluidos, se produce el fenómeno de ebullición nucleada de pileta o “pool-boiling”, en el cual se produce un cambio de fase, es decir, se genera un vapor que será alimentado al primer efecto de la planta EME y una corriente de agua de mar un poco más concentrada.

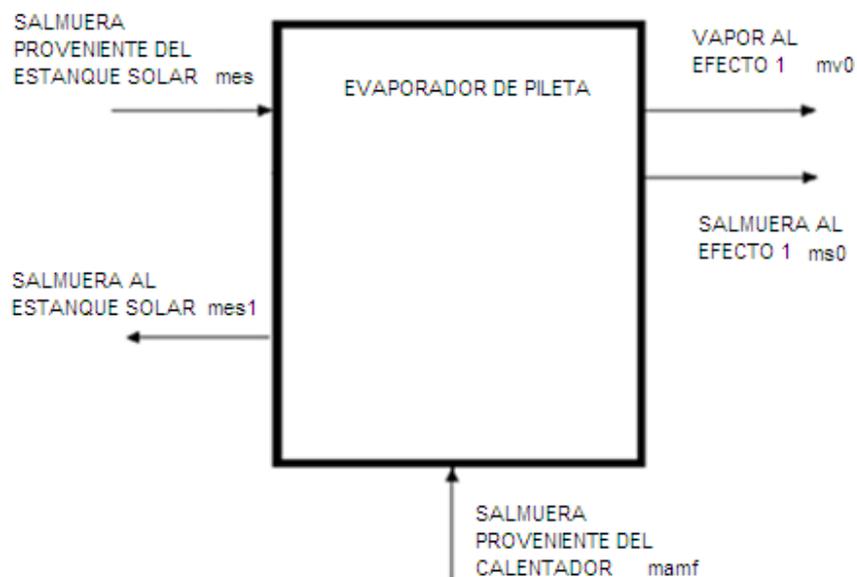


Figura 6.2. Evaporador de pileta.

6.4 PLANTA DE EVAPORACIÓN DE MÚLTIPLE EFECTO (EME)

Como tercera etapa del proceso tenemos a la planta de EME. El sistema de EME es formado por una secuencia de evaporadores de efecto simple, donde el vapor formado en un efecto, es usado en el efecto siguiente. El reutilizar el vapor en el sistema EME permite la reducción de la salmuera, de la temperatura, y del rechazo de una gran cantidad de energía hacia los alrededores, lo cual fue el principal inconveniente para el sistema de efecto simple (figura 3.1).

En nuestro caso particular la planta de EME propuesta está integrada de 4 efectos: el primer efecto es alimentado del vapor producido en el evaporador, además del agua de mar caliente también proveniente del evaporador. En este efecto se genera un nuevo vapor (vapor del efecto 1) como consecuencia del intercambio de calor, el cual estará a una temperatura menor que la del vapor generado en el evaporador, y dicho vapor será alimentado al segundo efecto, junto con el agua de mar caliente también generada en el efecto 1; de igual manera en el efecto 1 se produce un condensado que calentará al agua de mar y después se coleccionará como producto. Este procedimiento se repite en los efectos 2 y 3. En el último efecto, se realizará un procedimiento similar, pero el vapor generado será enviado a un condensador externo.

6.5 CONDENSADOR

Ahora bien, continuando con el acoplamiento de los procesos, tenemos un condensador, el cual calentará el agua de mar y condensará el vapor producido en el efecto 4; es importante señalar que parte del agua de mar que se alimenta al condensador se regresará al mar y parte se enviará al calentamiento posterior. El condensado se colecciona como parte del producto final.

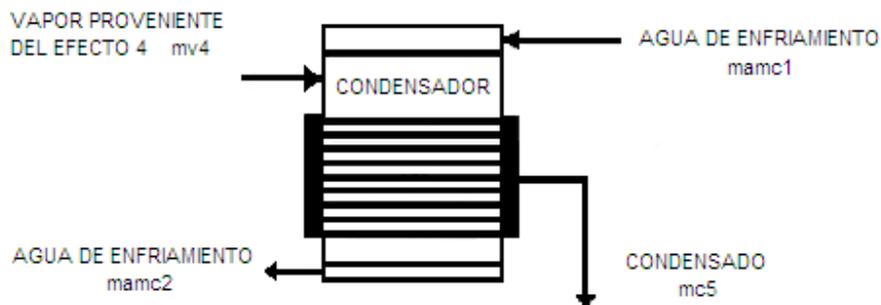


Figura 6.4. Condensador.

6.6 CALENTADOR LÍQUIDO-LÍQUIDO

La última parte de nuestro proceso de acoplamiento es definido por un calentador líquido-líquido, el cual cumple con la función de cerrar el ciclo del proceso, este calentador realizará el calentamiento del agua de mar proveniente de los efectos, así como del condensador previamente descritos, esta agua de mar será ingresada al evaporador, ya que dicha agua está a una

temperatura menor y que va a ser alimentada al evaporador, con el fin de evitar pérdidas térmicas, el calentador elevará la temperatura de dicha agua de alimentación a una temperatura adecuada, la cual se describirá más a detalle dentro del acoplamiento de los procesos.

Es importante mencionar que dicho calentador estará alimentado por salmuera caliente proveniente del estanque solar, la cual entrará al calentador cediendo el calor correspondiente y será regresada al estanque, repitiéndose el procedimiento de manera cíclica.

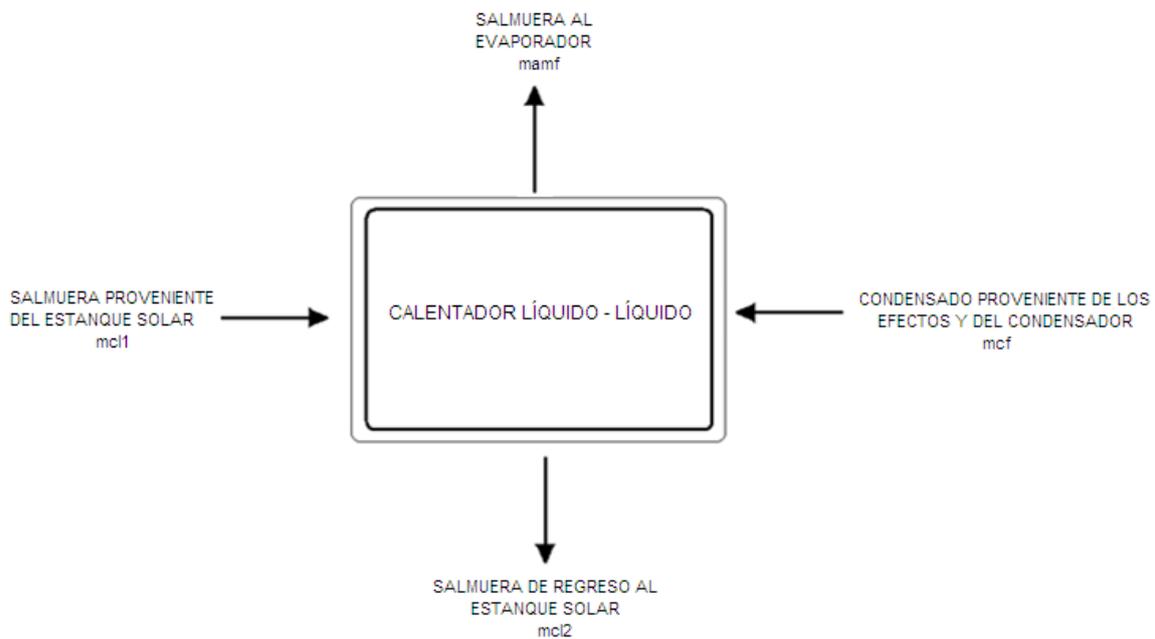


Figura 6.5. Calentador líquido – líquido.

6.7 ANÁLISIS NUMÉRICO DEL ACOPLAMIENTO DE LOS PROCESOS

Ahora como última fase para este análisis procederemos a realizar los cálculos correspondientes, tanto analíticos como numéricos, del proceso, obteniendo de esta manera un aproximado de lo que se llegaría a obtener, todo esto con el fin de obtener una conclusión en cuanto a si sería o no una opción viable la instalación estudiada. Es importante mencionar que se harán consideraciones que serán diferentes a los valores establecidos en anteriores capítulos de esta tesis; sin embargo, se seguirá la misma línea en cuanto al procedimiento.

Como primer paso procederemos a establecer los parámetros iniciales del proceso, para lo cual es importante señalar que se suponen 4 efectos dentro de la planta desaladora de múltiple efecto, (la planta de EME del capítulo 4 constaba de 5 efectos), una producción de 1 [kg/s] de agua dulce, una temperatura en el evaporador de 60 [°C], una temperatura de 75 [°C] de la salmuera extraída del estanque solar; como temperatura en el condensador externo se consideran 18 [°C], así como una salinidad de 35,000 [ppm] del agua de mar y 70,000 [ppm] de salinidad máxima.

6.7.1 Análisis del evaporador de pileta.

Primeramente procederemos a calcular el gasto másico de salmuera caliente extraída del estanque solar (\dot{m}_{es}), la cual posteriormente será alimentada al evaporador de pileta. Para obtener dicho gasto másico se utilizará la siguiente expresión:

$$\dot{m}_{es} = \frac{(\dot{m}_{v0})(h_{g0})}{(h_{es2} - h_{es1})} \quad (6.1)$$

Donde:

\dot{m}_{v0} =gasto másico de vapor producido en el evaporador e ingresado al efecto 1.

h_{g0} = entalpía (de tablas de vapor, T=60 [°C], X=1)

h_{es1} =entalpía (de tablas de vapor, T=75 [°C], X=0)

h_{es2} =entalpía (de tablas de vapor, T=65 [°C], X=0)

La cantidad de vapor producido en el evaporador (\dot{m}_{v0}), se supondrá como 0.2 [kg/s]. Es importante mencionar que este valor fue tomado aleatoriamente y puede ser modificado. Por lo tanto (tabla 6.1):

\dot{m}_{v0} [kg/s]	0.2
h_{g0} [kJ/kg]	2609
h_{es1} [kJ/kg]	314
h_{es2} [kJ/kg]	272

Tabla 6.1. Valores.

Substituyendo lo anterior en la expresión 6.1 tenemos:

$$\dot{m}_{es} = \frac{0.20 \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right] * 2609 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]}{\left(272 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right] \right) - \left(314 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right] \right)} = 12.42 \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$$

Con base en lo anterior, ahora sabemos la cantidad de salmuera caliente extraída del estanque, misma que será alimentada al evaporador de pileta.

Ahora como siguiente paso, procederemos a realizar los balances de masa y energía en el evaporador de la siguiente manera:

$$\text{Masa} \rightarrow \dot{m}_{amf} = \dot{m}_{v0} + \dot{m}_{s0} \quad (6.2)$$

$$\text{Energía} \rightarrow \dot{m}_{s0} h_{s0} - \dot{m}_{amf} h_{amf} + \dot{m}_{v0} \lambda_{v0} = \dot{Q}_{es} \quad (6.3)$$

$$\dot{Q}_{es} = \dot{m}_{es} (h_{es1} - h_{es2}) \quad (6.4)$$

Combinando las expresiones anteriores tenemos:

$$\dot{m}_{es} = \frac{\dot{m}_{v0} h_{g0}}{h_{es1} - h_{es2}} \quad (6.5)$$

Ahora bien, como siguiente paso procederemos a calcular el gasto másico de salmuera que sale del evaporador de pileta, la cual entrará al efecto 1 (\dot{m}_{s0}).

Utilizando la siguiente expresión:

$$\dot{m}_{s0} = \dot{m}_{amf} - \dot{m}_{v0} \quad (6.6)$$

Donde:

\dot{m}_{amf} = gasto másico del condensado proveniente del calentador.

\dot{m}_{v0} = gasto másico de la salmuera proveniente del evaporador y que entra al efecto 1.

Asimismo:

$$\dot{m}_{amf} = \frac{X_c}{X_{am}} (\dot{m}_p) \quad (6.7)$$

Donde:

X_c = salinidad del condensado, [ppm]

X_{am} = salinidad del agua de mar, [ppm]

\dot{m}_p = producto, [kg/s]

Ahora procederemos a sustituir los valores anteriores en la expresión 6.7. En este respecto se tiene lo siguiente (tabla 6.2):

X_c [ppm]	70,000
X_{am} [ppm]	35,000
\dot{m}_p [kg/s]	1

Tabla 6.2. Valores.

Por lo tanto:

$$\dot{m}_{amf} = \frac{70,000 \text{ [ppm]}}{35,000 \text{ [ppm]}} \left(1 \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right] \right) = 2 \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$$

Sustituyendo en la expresión 6.6, tenemos:

$$\dot{m}_{s0} = 2 \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right] - 0.20 \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right] = 1.8 \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$$

6.7. 1. 1 Cálculo del área de transferencia de calor del evaporador

Para diseñar o predecir el rendimiento de un evaporador de ebullición nucleada de piletas, es esencial relacionar la transferencia total de calor con cantidades tales como las temperaturas de entrada y salida del fluido, el coeficiente global de transferencia de calor y el área superficial global de transferencia de calor. Dos de tales relaciones se pueden obtener fácilmente al aplicar balances globales de energía a los fluidos caliente y frío. En particular, si \dot{Q}_{ev} es la transferencia de calor entre los fluidos caliente y frío y hay transferencia de calor insignificante entre el evaporador y sus alrededores, así como cambios de energía potencial y cinética despreciables, obtenemos las siguientes expresiones, [Incropera y Dewitt, 1993]:

$$\dot{Q}_{ev} = \dot{m}_h(h_{h,i} - h_{h,o}) \quad (6.8)$$

$$\dot{Q}_{ev} = \dot{m}_c(h_{c,o} - h_{c,i}) \quad (6.9)$$

Donde h es la entalpía del fluido. Los subíndices h y c se refieren a los fluidos caliente y frío, en tanto que i y o designan las condiciones de entrada y salida del fluido.

Se puede obtener otra expresión útil al relacionar la transferencia de calor \dot{Q} con la diferencia de temperatura ΔT_{ev} entre los fluidos caliente y frío, donde:

$$\Delta T_{ev} = T_h - T_c \quad (6.10)$$

Sin embargo como ΔT_{ev} varía con la posición del evaporador, es necesario trabajar con una ecuación de flujo de la forma:

$$\dot{Q}_{ev} = U_{ev}A_{ev}\Delta T_{evm} \quad (6.11)$$

Donde ΔT_{evm} es una diferencia de temperatura media apropiada. La ecuación 6.11 se puede usar con las ecuaciones 6.8 y 6.9 para llevar a cabo un análisis del evaporador. Antes de que se pueda realizar, sin embargo, se debe establecer la forma específica de ΔT_{evm} , por lo que para este caso específico consideraremos un evaporador de flujo paralelo.

Es importante señalar que, para el evaporador, la temperatura de salida del fluido frío nunca excede la del fluido caliente.

La forma de ΔT_{evm} se puede determinar mediante la aplicación de un balance de energía en los fluidos caliente y frío. Los balances de energía y el análisis subsecuente están sujetos a las siguientes suposiciones.

1. El evaporador está aislado de sus alrededores, en cuyo caso el único intercambio de calor es entre los fluidos caliente y frío.
2. La conducción axial a lo largo de los tubos es insignificante.
3. Los cambios de energía potencial y cinética son despreciables.
4. Las capacidades térmicas específicas del fluido son constantes.
5. El coeficiente global de transferencia de calor es constante.

Las capacidades térmicas específicas pueden cambiar, por supuesto, como resultado de variaciones de temperatura, y el coeficiente global de transferencia de calor también podría modificarse debido a variaciones en las propiedades del fluido y condiciones de flujo. Sin embargo, en muchas aplicaciones tales variaciones no son significativas, y es razonable trabajar con valores promedio.

Con base en lo anterior obtenemos la siguiente expresión:

$$\dot{Q}_{ev} = U_{ev} A_{ev} \Delta T_{ml} \quad (6.12)$$

Donde:

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_{2ev} - \Delta T_{1ev}}{\ln\left(\frac{\Delta T_{2ev}}{\Delta T_{1ev}}\right)} = \frac{\Delta T_{1ev} - \Delta T_{2ev}}{\ln((\Delta T_{1ev})(\Delta T_{2ev}))} \quad (6.13)$$

Es importante recalcar que, para el evaporador de flujo paralelo tenemos que:

$$\begin{cases} \Delta T_{1ev} == T_{h,1} - T_{c,1} = T_{h,i} - T_{c,i} \\ \Delta T_{2ev} == T_{h,2} - T_{c,2} = T_{h,o} - T_{c,o} \end{cases} \quad (6.14)$$

Por lo tanto, el área de transferencia de calor del evaporador se obtiene de la manera siguiente:

Fijamos los siguientes parámetros (tabla 6.3):

\dot{m}_c [kg/s]	2
\dot{m}_h [kg/s]	12.42
$T_{c,i}$ [°C]	60
$T_{c,o}$ [°C]	60
$T_{h,i}$ [°C]	75
$T_{h,o}$ [°C]	65

Tabla 6.3. Parámetros.

Donde:

\dot{m}_c = gasto másico del fluido frío.

\dot{m}_h = gasto másico del fluido caliente.

$T_{c,i}$ = temperatura de fluido frío a la entrada.

$T_{c,o}$ = temperatura del fluido frío a la salida.

$T_{h,i}$ = temperatura del fluido caliente a la entrada.

$T_{h,o}$ = temperatura del fluido caliente a la salida.

Sustituyendo en la ecuación 6.14 tenemos:

$$\Delta T_1 = T_{h,i} - T_{c,i} = 75 \text{ [°C]} - 60 \text{ [°C]} = 15 \text{ [°C]}$$

$$\Delta T_2 = T_{h,o} - T_{c,o} = 65 \text{ [°C]} - 60 \text{ [°C]} = 5 \text{ [°C]}$$

Sustituyendo ahora en la ecuación 6.13 tenemos:

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_{1ev} - \Delta T_{2ev}}{\ln(\Delta T_{1ev} \Delta T_{2ev})} = \frac{15[^\circ\text{C}] - 5[^\circ\text{C}]}{\ln(15 \cdot 5)} = 2.32 [^\circ\text{C}]$$

Consideraremos $U_{ev} = 1,000 [W/m^2 K]$, [J. Leblanc, y J. Andrews, 2007].

Ahora utilizando la expresión 6.8 calcularemos el valor de \dot{Q}_{ev} de la siguiente manera:

Primeramente, obtenemos los valores de las entalpías del fluido caliente a la entrada, $h_{h,i}$, y a la salida, $h_{h,o}$, de tablas de vapor obteniendo los siguientes valores (tabla 6.4):

$h_{h,i} [kJ/kg]$	313.93
$h_{h,o} [kJ/kg]$	272.06

Tabla 6.4. Entalpías.

Ahora sustituyendo en la ecuación 6.8 obtendremos el valor de \dot{Q}_{ev} :

$$\dot{Q}_{ev} = \dot{m}_h (h_{h,i} - h_{h,o}) = \left(12.42 \left[\frac{kg}{s}\right]\right) \left(313.93 \left[\frac{kJ}{kg}\right] - 272.06 \left[\frac{kJ}{kg}\right]\right)$$

$$\dot{Q}_{ev} = 520 [kW] = 520,000 [W]$$

Igualando el valor obtenido de \dot{Q}_{ev} con la expresión 6.12 tenemos:

$$520,000 [W] = U_{ev} A_{ev} \Delta T_{ml} \tag{6.15}$$

Despejando A_{ev} de la expresión 6.15 tenemos que:

$$A_{ev} = \frac{520 [kW]}{\Delta T_{ml} U_{ev}} \tag{6.16}$$

Ahora sustituyendo los valores de ΔT_{ml} y U_{ev} en la expresión 6.16 obtenemos el valor de A_{ev} de la siguiente manera:

$$A_{ev} = \frac{520,000 [W]}{(2.32^\circ\text{C}) \left(274,200 \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ\text{C}}\right]\right)}$$

$$A_{ev} = 0.82 [m^2]$$

6.7.2 Análisis del proceso de EME

Para los efectos tenemos que considerando la temperatura del vapor entrante al efecto 1, T_{v0} , con un valor de $60 [^\circ\text{C}]$ y la temperatura en el efecto 4 de $T_4 = 35 [^\circ\text{C}]$, se obtiene lo siguiente (tabla 6.5):

$$\Delta T_{ef} = \frac{T_{v0} - T_4}{n} = \frac{60 [^\circ\text{C}] - 35 [^\circ\text{C}]}{4} = 6.25 [^\circ\text{C}] \quad (6.17)$$

Efecto	1	2	3	4
T [°C]	53.75	47.5	41.25	35
T _v [°C]	53.75	47.5	41.25	35

Tabla 6.5. Temperaturas.

A continuación procederemos a realizar los balances en el efecto 1.

$$\text{Masa} \rightarrow \dot{m}_{s1} + \dot{m}_{v1} = \dot{m}_{s0} \quad (6.18)$$

$$\text{Energía} \rightarrow h_{s1}\dot{m}_{s1} + \dot{m}_{v1}\lambda_{v1} - h_{s0}\dot{m}_{s0} = \dot{m}_{v0}\lambda_{v0} \quad (6.19)$$

Combinando las expresiones 6.18 y 6.19, tenemos:

$$\dot{m}_{v1} = \frac{\dot{m}_{v0}\lambda_{v0} - \dot{m}_{s0}(h_{s1} - h_{s0})}{h_{g1}} \quad (6.20)$$

$$\dot{m}_{s1} = \dot{m}_{s0} - \dot{m}_{v1} \quad (6.21)$$

Para el efecto 2 tenemos que:

$$\text{Masa} \rightarrow \dot{m}_{s2} + \dot{m}_{v2} = \dot{m}_{s1} \quad (6.22)$$

$$\text{Energía} \rightarrow h_{s2}\dot{m}_{s2} + \dot{m}_{v2}\lambda_{v2} - h_{s1}\dot{m}_{s1} = \dot{m}_{v1}\lambda_{v1} \quad (6.23)$$

Combinando las expresiones 6.22 y 6.23, tenemos:

$$\dot{m}_{v2} = \frac{\dot{m}_{v1}(h_{g1} - h_{f1}) - \dot{m}_{s1}(h_{s2} - h_{s1})}{h_{g2}} \quad (6.24)$$

$$\dot{m}_{s2} = \dot{m}_{s1} - \dot{m}_{v2} \quad (6.25)$$

Del mismo modo, para el efecto 3, tenemos:

$$\text{Masa} \rightarrow \dot{m}_{s3} + \dot{m}_{v3} = \dot{m}_{s2} \quad (6.26)$$

$$\text{Energía} \rightarrow h_{s3}\dot{m}_{s3} + \dot{m}_{v3}\lambda_{v3} - h_{s2}\dot{m}_{s2} = \dot{m}_{v2}\lambda_{v2} \quad (6.27)$$

Combinando las expresiones 6.26 y 6.27, tenemos:

$$\dot{m}_{v3} = \frac{\dot{m}_{v2}(h_{g2} - h_{f2}) - \dot{m}_{s2}(h_{s3} - h_{s2})}{h_{g3}} \quad (6.28)$$

$$\dot{m}_{s3} = \dot{m}_{s2} - \dot{m}_{v3} \quad (6.29)$$

Asimismo para el efecto 4, tenemos lo siguiente:

$$\text{Masa} \rightarrow \dot{m}_{s4} + \dot{m}_{v4} = \dot{m}_{s3} \quad (6.30)$$

$$\text{Energía} \rightarrow h_{s4}\dot{m}_{s4} + \dot{m}_{v4}\lambda_{v4} - h_{s3}\dot{m}_{s3} = \dot{m}_{v3}\lambda_{v3} \quad (6.31)$$

Combinando las expresiones 6.30 y 6.31, tenemos:

$$\dot{m}_{v4} = \frac{\dot{m}_{v3}(h_{g3}-h_{f3})-\dot{m}_{s3}(h_{s4}-h_{s3})}{h_{g4}} \quad (6.32)$$

$$\dot{m}_{s4} = \dot{m}_{s3} - \dot{m}_{v4} \quad (6.33)$$

Como siguiente paso procederemos a calcular el gasto másico de salmuera y vapor para el efecto 1, de la siguiente manera (tabla 6.6):

h_{s0} [kJ/kg]	251.13
h_{s1} [kJ/kg]	225.02
h_{g0} [kJ/kg]	2609.6
h_{g1} [kJ/kg]	2598.71
h_{f0} [kJ/kg]	251.13

Tabla 6.6. Valores considerados en el efecto 1.

Sustituyendo en la ecuación 6.34, tenemos:

$$\lambda_{v0} = h_{g0} - h_{f0} = 2609.6 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right] - 251.13 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right] = 2358.47 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right] \quad (6.34)$$

Donde:

h_{f0} = entalpía (de tablas de vapor, T=60 [°C], X=0)

h_{g0} = entalpía (de tablas de vapor, T=60 [°C], X=1)

Asimismo, sustituyendo lo anterior en 6.20, tenemos:

$$\dot{m}_{v1} = \frac{(0.2 \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]) (2358.47 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]) - (1.8 \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]) (225.02 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right] - 251.13 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right])}{2598.71 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]} = 0.1995 \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$$

Ahora sustituyendo en la expresión 6.21, tenemos lo siguiente:

$$\dot{m}_{s1} = 1.8 \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right] - 0.1995 \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right] = 1.6 \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$$

Pasando al efecto 2, tenemos lo siguiente (tabla 6.7):

h_{s1} [kJ/kg]	225.02
h_{g1} [kJ/kg]	2598.71
h_{g2} [kJ/kg]	2587.51
h_{f1} [kJ/kg]	225.02
h_{s2} [kJ/kg]	198.90
\dot{m}_{s1} [kg/s]	1.6
\dot{m}_{v1} [kg/s]	0.1995

Tabla 6.7. Valores considerados en el efecto 2.

Sustituyendo estos valores en la expresión 6.24, tenemos:

$$\dot{m}_{v2} = \frac{(0.1995 \frac{\text{kg}}{\text{s}})(2598.71 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 225.02 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}) - (1.6 \frac{\text{kg}}{\text{s}})(198.90 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 225.02 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}})}{2587.51 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 0.1991 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Ahora utilizando la expresión 6.25, tenemos:

$$\dot{m}_{s2} = 1.6 \frac{\text{kg}}{\text{s}} - 0.1991 \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 1.4 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Del mismo modo para el efecto 3 se tiene lo siguiente (tabla 6.8):

h_{g2} [kJ/kg]	2587.51
h_{g3} [kJ/kg]	2576.44
h_{f2} [kJ/kg]	198.90
h_{s3} [kJ/kg]	172.79
h_{s2} [kJ/kg]	198.90
\dot{m}_{s2} [kg/s]	1.4
\dot{m}_{v2} [kg/s]	0.1991

Tabla 6.8. Valores considerados en el efecto 3.

Sustituyendo en la expresión 6.28 se obtiene lo siguiente:

$$\dot{m}_{v3} = \frac{(0.1991 \frac{\text{kg}}{\text{s}})(2587.51 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 198.90 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}) - (1.4 \frac{\text{kg}}{\text{s}})(172.79 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 198.90 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}})}{2576.44 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 0.1987 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Ahora sustituyendo en la expresión 6.29, se tiene:

$$\dot{m}_{s3} = 1.4 \frac{\text{kg}}{\text{s}} - 0.1987 \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 1.2 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Por último, para el cuarto efecto tenemos lo siguiente (tabla 6.9):

h_{f3} [kJ/kg]	172.79
h_{g3} [kJ/kg]	2576.44
h_{g4} [kJ/kg]	2565.3
h_{s3} [kJ/kg]	172.79
h_{s4} [kJ/kg]	146.68
\dot{m}_{s3} [kg/s]	1.2
\dot{m}_{v3} [kg/s]	0.1987

Tabla 6.9. Valores considerados en el efecto 4.

Sustituyendo en la ecuación 6.32, tenemos lo siguiente:

$$\dot{m}_{v4} = \frac{(0.1987 \frac{[kg]}{[s]})(2576.44 \frac{[kJ]}{[kg]} - 172.79 \frac{[kJ]}{[kg]}) - (1.2 \frac{[kg]}{[s]})(146.68 \frac{[kJ]}{[kg]} - 172.79 \frac{[kJ]}{[kg]})}{2565.30 \frac{[kJ]}{[kg]}} = 0.1983 \frac{[kg]}{[s]}$$

Ahora sustituyendo en la expresión 6.33, se tiene lo siguiente:

$$\dot{m}_{s4} = 1.20 \frac{[kg]}{[s]} - 0.1983 \frac{[kg]}{[s]} = 1 \frac{[kg]}{[s]}$$

Como siguiente paso se procederá a calcular las áreas de transferencia de calor para cada efecto de la siguiente manera:

Primeramente se calcularán los calores latentes para cada efecto utilizando la expresión 4.41, obteniendo lo siguiente (tabla 6.10):

λ_{v1} [kJ/kg]	2373.50
λ_{v2} [kJ/kg]	2388.55
λ_{v3} [kJ/kg]	2403.52
λ_{v4} [kJ/kg]	2418.43

Tabla 6.10. Calores latentes.

Adicionalmente, se calcularán los coeficientes de transferencia de calor para cada efecto utilizando la expresión 4.43, obteniendo lo siguiente (tabla 6.11):

U_1 [kW/m ² °C]	2.4
U_2 [kW/m ² °C]	2.28
U_3 [kW/m ² °C]	2.17
U_4 [kW/m ² °C]	2.06

Tabla 6.11. Coeficientes de transferencia de calor

Por otra parte, se calcularán las caídas de temperatura para cada efecto (ΔT_i), de la siguiente manera:

$$\Delta T_1 = \frac{T_{v0} - T_4}{U_1 \sum_{i=1}^n 1/U_i} = \frac{60 \text{ [}^\circ\text{C]} - 35 \text{ [}^\circ\text{C]}}{(2.4 \text{ [} \frac{\text{kW}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \text{]})(2.31 \text{ [} \frac{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}{\text{kW}} \text{]})} = 4.5 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (6.35)$$

$$\Delta T_2 = \Delta T_1 \left(\frac{U_1}{U_2} \right) = 4.5 \text{ [}^\circ\text{C]} \left(\frac{2.4 \text{ [} \frac{\text{kW}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \text{]}}{2.28 \text{ [} \frac{\text{kW}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \text{]}} \right) = 4.74 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (6.36)$$

$$\Delta T_3 = \Delta T_1 \left(\frac{U_1}{U_3} \right) = 4.5 \text{ [}^\circ\text{C]} \left(\frac{2.4 \text{ [} \frac{\text{kW}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \text{]}}{2.17 \text{ [} \frac{\text{kW}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \text{]}} \right) = 4.98 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (6.37)$$

$$\Delta T_4 = \Delta T_1 \left(\frac{U_1}{U_4} \right) = 4.5 \text{ [}^\circ\text{C]} \left(\frac{2.4 \text{ [} \frac{\text{kW}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \text{]}}{2.06 \text{ [} \frac{\text{kW}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \text{]}} \right) = 5.24 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (6.38)$$

Habiendo obtenido lo anterior procederemos a calcular las áreas de transferencia de calor para cada efecto:

$$A_1 = \frac{\dot{m}_{v1} \lambda_{v1}}{U_1 (\Delta T_1 - \Delta T_{\text{perdidas}})} = \frac{(0.1995 \text{ [} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \text{]})(2373.50 \text{ [} \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \text{]})}{(2.4 \text{ [} \frac{\text{kW}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \text{]})(4.5 \text{ [}^\circ\text{C]} - 0.5 \text{ [}^\circ\text{C]})} = 49.32 \text{ [m}^2\text{]} \quad (6.39)$$

$$A_2 = \frac{\dot{m}_{v2} \lambda_{v2}}{U_2 (\Delta T_2 - \Delta T_{\text{perdidas}})} = \frac{(0.1991 \text{ [} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \text{]})(2388.55 \text{ [} \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \text{]})}{(2.28 \text{ [} \frac{\text{kW}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \text{]})(4.74 \text{ [}^\circ\text{C]} - 0.5 \text{ [}^\circ\text{C]})} = 49.19 \text{ [m}^2\text{]} \quad (6.40)$$

$$A_3 = \frac{\dot{m}_{v3} \lambda_{v3}}{U_3 (\Delta T_3 - \Delta T_{\text{perdidas}})} = \frac{(0.1987 \text{ [} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \text{]})(2403.52 \text{ [} \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \text{]})}{(2.17 \text{ [} \frac{\text{kW}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \text{]})(4.98 \text{ [}^\circ\text{C]} - 0.5 \text{ [}^\circ\text{C]})} = 49.12 \text{ [m}^2\text{]} \quad (6.41)$$

$$A_4 = \frac{\dot{m}_{v4} \lambda_{v4}}{U_4 (\Delta T_4 - \Delta T_{\text{perdidas}})} = \frac{(0.1983 \text{ [} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \text{]})(2418.43 \text{ [} \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \text{]})}{(2.06 \text{ [} \frac{\text{kW}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \text{]})(5.24 \text{ [}^\circ\text{C]} - 0.5 \text{ [}^\circ\text{C]})} = 49.11 \text{ [m}^2\text{]} \quad (6.42)$$

Ahora procederemos a calcular el área promedio (A_m), utilizando la expresión 4.71 de la siguiente manera:

$$A_m = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{n} = \frac{49.32 \text{ [m}^2\text{]} + 49.19 \text{ [m}^2\text{]} + 49.12 \text{ [m}^2\text{]} + 49.11 \text{ [m}^2\text{]}}{4} = 49.19 \text{ [m}^2\text{]}$$

6.7.3 Análisis del condensador externo.

Como primer paso procederemos a calcular el gasto másico de agua de mar requerida en el condensador. Para esto se hace el balance de masa y energía en el condensador de la siguiente manera:

$$\text{Masa} \rightarrow \dot{m}_{amc2} + \dot{m}_{c5} = \dot{m}_{amc1} \quad (6.43)$$

$$\text{Energía} \rightarrow h_{amc2} \dot{m}_{amc2} + \dot{m}_{c5} \lambda_{v5} - h_{amc1} \dot{m}_{amc1} = \dot{m}_{v4} \lambda_{v4} \quad (6.44)$$

Combinando las expresiones 6.43 y 6.44 tenemos lo siguiente:

$$\dot{m}_{amc} = \frac{\dot{m}_{v4}(h_g - h_f)}{h_{c2} - h_{c1}} \quad (6.45)$$

Ahora bien, sustituyendo los siguientes valores de entalpías, los cuales fueron obtenidos de tablas de vapor, así como \dot{m}_{v4} dentro de la expresión 6.45, tenemos lo siguiente (tabla 6.12):

h_g [kJ/kg]	2665.30
h_f [kJ/kg]	146.68
h_{c2} [kJ/kg]	125.79
h_{c1} [kJ/kg]	75.58
\dot{m}_{v4} [kg/s]	0.1983

Tabla 6.12. Valores para el condensador.

$$\dot{m}_{amc} = \frac{(0.1983 \frac{\text{kg}}{\text{s}})(2665.3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 146.68 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}})}{(125.79 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}) - (75.58 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}})} = 9.55 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Asimismo, procederemos a calcular la diferencia media logarítmica $(LMTD)_c$ utilizando la expresión 4.75, de la siguiente manera:

$$(LMTD)_c = \frac{(T_{cw2} - T_{cw1})}{\ln\left(\frac{T_4 - \Delta T_{pérdidas} - T_{cw1}}{T_4 - \Delta T_{pérdidas} - T_{cw2}}\right)} = \frac{12}{1.3} = 9.23 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Donde:

T_{cw2} =temperatura a la que sale el agua de mar que sale del condensador, 30 [°C]

T_4 =temperatura del vapor que entra al condensador proveniente del efecto 4, 35 [°C]

T_{cw1} =temperatura a la que entra el agua de mar al condensador, 18 [°C]

$\Delta T_{pérdidas}$ =0.5 [°C]

Ahora procederemos a calcular la carga térmica del condensador externo.

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_{v4} \lambda_{v4} \quad (6.46)$$

Sustituyendo los valores correspondientes dentro de la expresión 6.46, tenemos lo siguiente:

$$\dot{Q}_c = \left(0.1983 \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right]\right) \left(2418.43 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right]\right) = 480 \text{ [kW]}$$

Con base en lo anterior se procederá a calcular el área de transferencia de calor del condensador utilizando la expresión 4.76, donde $U_c = 1.75 \text{ [kW/m}^2 \text{ °C]}$, [Muñoz, 2008], de la siguiente manera:

$$A_c = \frac{480 \text{ [kW]}}{\left(1.75 \left[\frac{\text{kW}}{\text{m}^2 \text{ °C}}\right]\right)(9.23 \text{ [°C]})} = 29.72 \text{ [m}^2\text{]}$$

6.8 TABLAS DE RESULTADOS

Efecto	1	2	3	4
A [m ²]	49.32	49.19	49.12	49.11
T [°C]	53.75	47.5	41.25	35
ΔT [°C]	4.5	4.74	4.98	5.24
m _s [kg/s]	1.6	1.4	1.2	1
m _v [kg/s]	0.1995	0.1991	0.1987	0.1983
U [kW/m ² °C]	2.4	2.28	2.17	2.06
λ _v	2373.5	2388.55	2403.52	2418.43

Tabla 6.13. Resultados del análisis del proceso de EME.

m _{amc} [kg/s]	9.55
Q _c [kW]	480
A _c [m ²]	29.72
Q _{ev} [kW]	520
A _{ev} [m ²]	0.82
m _{amf} [kg/s]	2
m _{s0} [kg/s]	1.8
m _{es} [kg/s]	12.42

Tabla 6.14. Resultados del análisis del condensador y del evaporador.

NOMENCLATURA CAPÍTULO 6

- Alfabeto convencional

- A_1 - (Área de transferencia de calor del efecto 1) [m^2]
 A_2 - (Área de transferencia de calor del efecto 2) [m^2]
 A_3 - (Área de transferencia de calor del efecto 3) [m^2]
 A_4 - (Área de transferencia de calor del efecto 4) [m^2]
 A_{ev} - (Área de transferencia de calor del evaporador) [m^2]
 A_c - (Área de transferencia de calor en el condensador) [$^\circ C$]
 \dot{Q}_c - (Carga térmica del condensador externo) [$^\circ C$]
 \dot{Q}_{es} - (Carga térmica proporcionada por el estanque solar) [W]
 U_1 - (Coeficiente de transferencia de calor en el efecto 1) [$kW/m^2^\circ C$]
 U_2 - (Coeficiente de transferencia de calor en el efecto 2) [$kW/m^2^\circ C$]
 U_3 - (Coeficiente de transferencia de calor en el efecto 3) [$kW/m^2^\circ C$]
 U_4 - (Coeficiente de transferencia de calor en el efecto 4) [$kW/m^2^\circ C$]
 U_c - (Coeficiente de transferencia de calor en el condensador) [$kW/m^2^\circ C$]
 U_{ev} - (Coeficiente de transferencia de calor en el evaporador) [$kW/m^2^\circ C$]
 $(LMTD)_c$ - (Diferencia media logarítmica térmica en el condensador) [$^\circ C$]
 h_{amc1} - (Entalpía del agua de mar de enfriamiento que entra al condensador) [kJ/kg]
 h_{amc2} - (Entalpía del agua de mar de enfriamiento que sale del condensador) [kJ/kg]
 $h_{h,i}$ - (Entalpía del fluido caliente a la entrada en el evaporador) [kJ/kg]
 $h_{h,o}$ - (Entalpía del fluido caliente a la salida en el evaporador) [kJ/kg]
 $h_{c,i}$ - (Entalpía del fluido frío a la entrada en el evaporador) [kJ/kg]
 $h_{c,o}$ - (Entalpía del fluido frío a la salida en el evaporador) [kJ/kg]
 h_{f0} - (Entalpía de la salmuera que entra al evaporador y regresa al estanque solar) [kJ/kg]
 h_{amf} - (Entalpía de la salmuera que sale del calentador e ingresa al evaporador) [kJ/kg]
 h_{s1} - (Entalpía de la salmuera que sale del efecto 1 e ingresa al efecto 2) [kJ/kg]
 h_{s2} - (Entalpía de la salmuera que sale del efecto 2 e ingresa al efecto 3) [kJ/kg]
 h_{s3} - (Entalpía de la salmuera que sale del efecto 3 e ingresa al efecto 4) [kJ/kg]
 h_{es1} - (Entalpía de la salmuera que sale del estanque e ingresa al evaporador) [kJ/kg]
 h_{s0} - (Entalpía de la salmuera que sale del evaporador e ingresa al efecto 1) [kJ/kg]
 h_{es2} - (Entalpía de la salmuera que sale del evaporador y regresa al estanque solar) [kJ/kg]
 h_{s4} - (Entalpía de la salmuera que sale del efecto 4) [kJ/kg]
 h_{g0} - (Entalpía del vapor producido en el evaporador e ingresado al efecto 1) [kJ/kg]
 \dot{m}_{amc1} - (Gasto másico de agua de enfriamiento que entra al condensador) [kg/s]
 \dot{m}_{amc2} - (Gasto másico de agua de enfriamiento que sale del condensador) [kg/s]
 \dot{m}_{amc} - (Gasto másico de agua de mar de enfriamiento requerida en el condensador) [kg/s]
 \dot{m}_{c5} - (Gasto másico de condensado que sale del condensador) [kg/s]
 \dot{m}_h - (Gasto másico del fluido caliente en el evaporador) [kg/s]
 \dot{m}_c - (Gasto másico del fluido frío en el evaporador) [kg/s]
 \dot{m}_{es} - (Gasto másico de salmuera caliente extraída del estanque solar) [kg/s]
 \dot{m}_{amf} - (Gasto másico de salmuera extraída del calentador e ingresado al evaporador) [kg/s]
 \dot{m}_{s1} - (Gasto másico de salmuera que sale del efecto 1 e ingresa al efecto 2) [kg/s]
 \dot{m}_{s2} - (Gasto másico de salmuera que sale del efecto 2 e ingresa al efecto 3) [kg/s]
 \dot{m}_{s3} - (Gasto másico de salmuera que sale del efecto 3 e ingresa al efecto 4) [kg/s]

\dot{m}_{s4} - (Gasto másico de salmuera que sale del efecto 4) [kg/s]
 \dot{m}_{s0} - (Gasto másico de salmuera que sale del evaporador e ingresa al efecto 1) [kg/s]
 \dot{m}_{v0} - (Gasto másico de vapor producido en el evaporador e ingresado al efecto 1) [kg/s]
 \dot{m}_{v1} - (Gasto másico de vapor producido en el efecto 1 e ingresado al efecto 2) [kg/s]
 \dot{m}_{v1} - (Gasto másico de vapor producido en el efecto 1 e ingresado al efecto 2) [kg/s]
 \dot{m}_{v2} - (Gasto másico de vapor producido en el efecto 2 e ingresado al efecto 3) [kg/s]
 \dot{m}_{v3} - (Gasto másico de vapor producido en el efecto 3 e ingresado al efecto 4) [kg/s]
 \dot{m}_{v4} - (Gasto másico de vapor producido en el efecto 4 e ingresado al condensador) [kg/s]
 \dot{m}_p - (Producto) [kg/s]
 X_{am} - (Salinidad del agua de mar) [ppm]
 X_c - (Salinidad del condensado) [ppm]
 T_{cw2} - (Temperatura del agua de mar de enfriamiento que sale del condensador) [°C]
 T_{cw1} - (Temperatura del agua de mar de enfriamiento que entra al condensador) [°C]
 T_{cw2} - (Temperatura del agua de mar de enfriamiento que sale del condensador) [°C]
 T_h - (Temperatura del fluido caliente) [°C]
 T_c - (Temperatura del fluido frío) [°C]
 T_{v1} - (Temperatura del vapor entrante al efecto 1) [°C]
 T_{v2} - (Temperatura del vapor entrante al efecto 2) [°C]
 T_{v3} - (Temperatura del vapor entrante al efecto 3) [°C]
 T_{v4} - (Temperatura del vapor entrante al efecto 4) [°C]
 T_1 - (Temperatura en el efecto 1) [°C]
 T_2 - (Temperatura en el efecto 2) [°C]
 T_3 - (Temperatura en el efecto 3) [°C]
 T_4 - (Temperatura en el efecto 4) [°C]
 \dot{Q}_{ev} - (Transferencia de calor entre los fluidos caliente y frío en el evaporador) [W]

- Símbolos griegos

ΔT_1 - (Caída de temperatura en el efecto 1) [°C]
 ΔT_2 - (Caída de temperatura en el efecto 2) [°C]
 ΔT_3 - (Caída de temperatura en el efecto 3) [°C]
 ΔT_4 - (Caída de temperatura en el efecto 4) [°C]
 $\Delta T_{pérdidas}$ - (Caída de temperatura por pérdidas) [°C]
 λ_{v5} - (Calor latente en el condensador) [kJ/kg]
 λ_{v1} - (Calor latente en el efecto 1) [kJ/kg]
 λ_{v2} - (Calor latente en el efecto 2) [kJ/kg]
 λ_{v3} - (Calor latente en el efecto 3) [kJ/kg]
 λ_{v4} - (Calor latente en el efecto 4) [kJ/kg]
 ΔT_{ef} - (Diferencia de temperatura a través de los efectos) [°C]
 ΔT_{evm} - (Diferencia de temperatura media apropiada) [°C]
 ΔT_{ml} - (Diferencia de temperatura media logarítmica) [°C]
 ΔT_{ev} - (Diferencia de temperatura entre los fluidos caliente y frío en el evaporador) [°C]
 ΔT_{1ev} - (Diferencia de temperatura 1 en el evaporador) [°C]
 ΔT_{2ev} - (Diferencia de temperatura 2 en el evaporador) [°C]

7

ANÁLISIS ECONÓMICO PRELIMINAR

7.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se realiza un balance que establezca el interés de la planta estudiada, todo esto con el objetivo de saber si es viable económicamente hablando la realización del mismo.

7.2 CÁLCULO DE COSTO POR METRO CUADRADO

Para una planta de EME de 1000 [m³/día] de capacidad se estima un costo de 57, 200, 000 [\$]. [Muñoz, 2008]. Los costos de los estanques solares varían con el área de captación. Para nuestro caso en particular tomaremos el área de captación obtenido en el capítulo 5.

En este sentido, nuestro estanque solar cuenta con un área de captación de 568,622 [m²], por lo que para calcular el costo en [\$/m²] tomamos como referencia los siguientes datos, [Muñoz, 2008]:

220 [\$/m²] para un estanque de 250,000 [m²]

114 [\$/m²] para un estanque de 1 [km²]

96 [\$/m²] para un estanque de de 2 [km²]

Por lo que se estimará un costo de 180 [\$/m²] para el estanque solar.

7.3 COSTO DEL ESTANQUE CON OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

Ahora bien, suponiendo una duración de 20 años y tomando el valor de 180 [\$/m²] podemos calcular el costo del estanque de la siguiente manera:

$$C_E = C_m * A_C \quad (7.1)$$

Donde:

C_E=costo del estanque.

C_m=costo del estanque por [m²].

A_C=área de captación.

Por lo que sustituyendo los valores correspondientes en la ecuación 7.1 tenemos:

$$C_E = \left(180 \left[\frac{\$}{m^2} \right] \right) (568,622 [m^2]) = 102, 351, 960 [\$]$$

El costo de operación y mantenimiento es del 3 al 4% del costo de la inversión por año. Usualmente los valores menores son para grandes estanques y viceversa [Fisher, 2006].

Considerando el costo de operación y mantenimiento como un 4% del costo de inversión por año, tenemos:

$$C_{OYM} = C_E + (C_E * P_{INV} * D) \quad (7.2)$$

Donde:

C_{OYM} =costo del estanque con operación y mantenimiento.

C_E =costo del estanque.

P_{INV} =porcentaje de operación y mantenimiento del costo de inversión por año.

D =vida productiva de la planta EME.

Sustituyendo en la ecuación 7.2, tenemos:

$$C_{OYM} = (102,351,960 [\text{\$}]) + [(102,351,960[\text{\$}])(0.04)(20[\text{años}])]$$

$$C_{OYM} = (102,351,960[\text{\$}]) + (81,881,568[\text{\$}])$$

$$C_{OYM} = 184,233,528 [\text{\$}]$$

Sumando el costo del estanque con operación y mantenimiento al costo de la planta EME podemos obtener el costo total (C_T) de la siguiente manera:

$$C_T = 57,200,000 [\text{\$}] + 184,233,528 [\text{\$}]$$

$$C_T = 241,433,528 [\text{\$}]$$

7.4 CÁLCULO DEL COSTO DE PRODUCCIÓN DE AGUA DULCE

Considerando una vida productiva de la planta desaladora de EME de 20 años y la capacidad de la planta de 1000 [m³/día] se calcula la producción de agua dulce (P_{AGUA}) y el costo de producción de la misma de la siguiente manera:

$$P_{AGUA} = \left(1000 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{día}}\right]\right) \left(\frac{365 [\text{día}]}{1 [\text{año}]}\right) (20 [\text{años}]) = 7.3 \times 10^6 [\text{m}^3]$$

$$C_{AGUA} = \frac{(C_T)}{(P_{AGUA})} = \left(\frac{241,433,528 [\text{\$}]}{7.3 \times 10^6 [\text{m}^3]}\right)$$

$$C_{AGUA} = 33 \left[\frac{\text{\$}}{\text{m}^3}\right]$$

Comparativamente, se conoce que el costo para una planta de EIME y una de ósmosis inversa (OI) es de 9 y 6 [\$/m³], respectivamente, para la capacidad especificada.

7.5 TABLA DE RESULTADOS

C_E [\$]	102,351,960
C_{OYM} [\$]	184,233,528
C_T [\$]	241,433,528
P_{AGUA} [m ³]	730,0000
C_{AGUA} [\$/m ³]	33

Tabla 7.1. Resultados capítulo 7.

NOMENCLATURA CAPÍTULO 7

- Alfabeto convencional

A_c – (Área de captación) [m^2]

C_E – (Costo del estanque solar) [\\$]

C_{OYM} – (Costo del estanque solar con operación y mantenimiento) [\\$]

C_m – (Costo del estanque solar por metro cuadrado) [S]

C_{AGUA} – (Costo de producción de agua dulce) [\\$]

C_T – (Costo total) [\\$]

P_{INV} – (Porcentaje de operación y mantenimiento del costo de inversión por año) [%]

P_{AGUA} – (Producción de agua dulce) [m^3]

D – (Vida productiva de la planta) [año]

8

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el presente trabajo se propuso estudiar la construcción y operación de un estanque solar determinando las cantidades de agua y sal para la zona superior e inferior del estanque solar mediante la ubicación del estanque en algún sitio adecuado de la República Mexicana; se estimó la radiación solar que incide sobre la superficie del estanque, la cual será utilizada para calentar la zona inferior del estanque. Asimismo, se estimó la cantidad de agua necesaria para conservar la zona superior del estanque y la cantidad de sal requerida para mantener saturada a la zona inferior del mismo.

Adicionalmente, se estudió la operación de un proceso de desalación de EME calculando los balances de masa y energía, y estableciendo, mediante la dinámica de operación del estanque y del proceso desalador, el acoplamiento dinámico de los procesos.

Las conclusiones a las que se llega después de haber realizado estos análisis son las mencionadas a continuación:

- La desalación de agua de mar es una técnica en la cual nos debemos apoyar fuertemente para resolver el problema del agua en toda la parte norte del país, ya que en esta zona se cuenta con problemas de escasez de agua durante el año.
- La desalación de agua de mar mediante un proceso desalador de EME utilizando un estanque solar como fuente de energía representa un costo mayor en comparación con otras tecnologías como la ósmosis inversa; sin embargo, la viabilidad de este proceso se refleja en la posibilidad de desarrollarlo en lugares de difícil acceso en donde el poner este proceso de desalación EME es relativamente sencillo y podemos alimentar de agua dulce de una manera sencilla y confiable a estas poblaciones.
- El uso del estanque solar como fuente de energía para la planta desaladora es de gran importancia, ya que se elimina el uso de combustibles durante el proceso. Desde el punto de vista ambiental esto contribuye en la reducción de emisión de gases contaminantes durante el proceso de desalación y desde el punto de vista económico reduce el costo en la producción de destilado en el proceso de desalación, si se utilizara algún tipo de combustible.
- La desalación añade diversidad y, por lo tanto, asegura un sistema de abastecimiento de agua, ya que es fundamentalmente diferente a las fuentes convencionales de agua, y las podría complementar.
- Las nuevas mejoras en la tecnología de los procesos de desalación continuarán y la reducción de costos conducirá aún más al crecimiento de la desalación como solución para el abastecimiento de agua.

Para continuar con este trabajo de tesis, es necesario llevar a cabo un estudio más detallado de las zonas de la República Mexicana donde la radiación solar es mayor, de manera que el proceso

desalador estudiado, principalmente el estanque solar, sea ubicado de manera estratégica en estas zonas y realizar nuevamente el análisis del proceso EME, de manera que con dicho nuevo conjunto de datos y con base en ellos obtener un diseño más preciso del proceso de desalación en estudio.

Realizar un diseño experimental y selección de materiales de los equipos que se encuentran presentes en el proceso de desalación tipo EME –estanque solar, evaporador, condensador, calentador, etcétera-. Realizar un prototipo de laboratorio con el fin de observar las ventajas y complicaciones técnicas al momento de trabajar a diferentes condiciones de operación.

REFERENCIAS

BIBLIOGRÁFICAS

- Hisham T. El – Dessouky, Hisham M. Ettouney, Faisal Mandani.,
Performance of parallel feed multiple effect evaporation system for seawater desalination.
Applied Thermal Engineering. Num. 20. 2000. pp. 1679 – 1706.
PERGAMON.
- Hisham T. El – Dessouky, Hisham M. Ettouney, Faisal Mandani.,
Multiple-effect evaporation desalination systems: thermal analysis.
Desalination. Num. 125. 1999. pp. 260 – 276.
ELSEVIER.
- Kreith, Frank & Kreider Jan F.,
Principles of solar Engineering
Series in Thermal and Fluid Engineering. Hemisphere Publishing Corporation.
USA, 1978.
- Almanza, R. y Muñoz, F.,
Ingeniería de la energía solar
Cromocolor, México, 2003. pp. 109 – 161.
- Alan, S. Foust y Leonard, A. Wenzel.,
Principios de operaciones unitarias.
CECSA. 1997. 6ta edición. pp. 508 – 520.
- Muñoz, G. Felipe.,
Cálculo de un estanque solar como fuente de energía de la desalación de agua de mar
ANES, 2008.
- Rabl A., Nielsen C.E.,
Solar ponds for space heating,
Solar Energy, vol. 17, EUA (1975), 1-12.
- Fisher, U., Weinberg, J. and Doron, B.,
Integration of solar pond with water desalination, in renewable energy system and desalination, Encyclopedia of Desalination and Water Resources,
Eolss Publishers, Oxford, U.K. 2006.
- Szacs vay, T., Hofer-Naser, P., Posmansky, M.,
Technical and economic aspects of small-scale-pond-powered seawater desalination systems, *Desalination* 122(1999) 185-193.
- Frank P. Incropera, David P. Dewitt.,
Fundamentos de transferencia de calor

PEARSON, 1996. pp. 581-618.

- Hisham T., El-Dessousky, Hisham M., Ettouney.,
Fundamentals of Salt Water Desalination
Department of Chemical Engineering and Petroleum Kuwait University.
ELSEVIER, 2002.
- Lara, J., "*Modelo teórico de un estanque solar no convectivo aplicable a la República Mexicana*", tesis ingeniero químico, Facultad de Química, UNAM, 1983.
- Almanza, R. y López, S., *Radiación solar global en la República Mexicana mediante datos de insolación*, núm. 357, Instituto de Ingeniería, UNAM, 1975.
- Rodríguez, T. Ulises, "*Desalación por compresión mecánica del vapor utilizando agua caliente*", tesis ingeniero mecánico, Facultad de Ingeniería, UNAM, 2009.

De Internet

- Benítez, V. (2007). Desalación de Agua de Mar con Energías Renovables (Núm. 35, Gaceta 27).
www.impulsa4.unam.mx , Proyecto IMPULSA.
(13 Jun. 2008)
- Bharat, G. (2003). The Energy and Resources Institute.
www.teriin.org
(3 Jul. 2009)
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM, (2001)
<http://www.ideam.gov.co/>
(22 Ago. 2009)
- Ophir, A.(2005). Latest Developments in MED and MVC Thermal Desalination Processes
www.ide-tech.com, International Desalination Association.
(29 Ago. 2009)
- THE EPPLEY LABORATORY, INC. (2004).
www.eppleylab.com , Introduction to Solar Radiation.
(8 Oct. 2009)
- Tablada, J. El hilo dorado: La energía solar.
<http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/119/htm/sec6.htm>
(13 Nov. 2009)
- Canicularis. (2008).
Es Renovable (Blog orientado al uso y difusión de las fuentes de energía renovable, cultura ecológica y denuncia ambiental) Disponible:
<http://esrenovable.blogspot.com/2008/07/los-estanques-solares.html>
(15 Nov. 2009)