



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

ESTUDIO COMPARATIVO DE DOS SISTEMAS DE EVAPORACIÓN DE
EFLUENTES INDUSTRIALES PARA CERO DESCARGAS

TESIS MANCOMUNADA
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO
PRESENTAN:
JUAN ANTONIO PÉREZ NAVA Y
SALVADOR VILLASECA ROMERO



MÉXICO, DF.

2007



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.

Jurado Asignado:

Presidente

Prof. Torres Merino Jesús

Vocal

Prof. Silva Pichardo Genovevo

Secretario

Prof. Gutiérrez Alejandre Aída

Primer Suplente

Prof. Vargas Hernández María de los Ángeles

Segundo Suplente

Prof. López Castillo Néstor Noe

Sitio donde se desarrolló el tema:

Laboratorio de Ingeniería Química.

Facultad de Química.

UNAM

Asesor

Dr. Jesús Torres Merino

Sustentantes:

Juan Antonio Pérez Nava

Salvador Villaseca Romero

Para triunfar no se requiere ser privilegiado con dones especiales. Se requiere tan solo ser una persona normal con la claridad de saber quien es y que quiere ser, no dentro de un mes o el año que viene, sino para todo su futuro, que es lugar donde pasará el resto de su vida.

Agradecimientos Salvador Villaseca Romero:

A Dios: Omnipotente y omnipresente con todas las criaturas del universo, un tributo por lo que me diste.

Al señor de Chalma: Por encomendarme a ti brindándome la fortaleza y fe necesaria para seguir adelante.

A mis padres: Sr. Eliseo y Sra. Porfiria. Como un testimonio de infinito aprecio y eterno agradecimiento, por el apoyo y consejo que siempre me han brindado y con la cual he logrado terminar la más grande de mis metas siendo para mi la mejor de las herencias. Con admiración y respeto.

A mis hermanas y hermano: Gaby, Lizeth y Ulises. Porque juntos emprendimos el camino, ustedes son parte importante de lo que soy.

Al amor de mi vida y linda esposa: Reynis por la motivación, estímulo, confianza y por estar conmigo brindándome el apoyo incondicional en estos momentos tan importantes de mi vida. TE AMO.

A todos mis familiares: Abuelos, tíos, primos y parientes cercanos que me aprecian y me apoyan.

A mi asesor: Dr. Jesús Torres por toda su atención y paciencia para la realización de este trabajo.

A mis amigos de la facultad: Abel (Macuarro), Santiago (Lagrima), Jaime (Barney), Mauricio (Microsoft), Eduardo (Alfil), Fabian (Di Caprio), Omar

(Kosako), Arturo (Arthur), por compartir inolvidables experiencias en esta etapa de mi vida. NUNCA LOS OLVIDARE.

A Grupo ACEA y al Ing. Horacio Portillo por brindarnos la información y el apoyo necesario para la culminación de este trabajo.

A mí estimado amigo: Juan Antonio que siempre me apoyo a lo largo de la carrera y en la culminación de esta, motivándome siempre para seguir adelante.

A todos mis maestros: Por darme la formación y los conocimientos necesarios para llegar ser alguien importante en la vida.

A los Profesores: Ing. Genovevo y Dra. Aída por sus observaciones y correcciones en el presente trabajo.

A los señores del taller mecánico: Don Herminio y colaboradores por la facilidad de brindarnos la herramienta necesaria para la instalación del equipo.

A la UNAM, por el privilegio que me dio de ser orgullosamente universitario, y que desde mi adolescencia fue como mi segundo hogar. "POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

"MUCHAS GRACIAS"

Agradecimientos: Juan Antonio Pérez Nava

Hay mucha gente a la que debo agradecimiento por su aportación, directa o indirecta, a mi tesis. He intentado aprender un poco de cada una de las personas que he encontrado en el camino, y que han sido una fuente de inspiración.

A mi madre la gran señora **Virginia Nava**, quien lucho diariamente para sacarnos adelante. Una gran mujer, se que me ama profundamente, me lo demuestra cada día. De la misma manera la amo yo, por su paciencia, sabiduría, por saber guiarme en los momentos más difíciles y por hacer posible este gran sueño. Nunca podré pagar, que más que madre, seas ángel y guía. Gracias a tu cuidado y esfuerzo, a tus lágrimas y desvelos, a tu sonrisa y abrigo y a tus palabras y a tu silencio hemos llegado hasta aquí. Como poder expresar mí más sincero agradecimiento por tantas noches de desvelo y por tantos días de sacrificio que pasaste por mí y mis hermanos. Mil gracias por siempre haber estado con nosotros en las buenas y en las malas. El milagro más grande es ser tu hijo.

A mi querida esposa **Elvia** el amor de mi vida, por su confianza, incondicional apoyo, estímulo y motivación y que con el paso del tiempo aprendí muchas cosas de ti, tu entrega, tu coraje, tu ternura, tus ganas de vivir, ese don maravilloso de ser madre, el apoyo incondicional que me diste en todo momento, en fin, no sé de donde sacas tanta fuerza para darte a los demás, sobre todo a mi que a veces creo no merecerlo, pero como todo, llega el momento de hacer un alto en el camino para mirar atrás, ver lo que has significado en mi vida y sobre todo para decirte: GRACIAS.

A mi pequeño angelito de nombre **Joel** te he visto crecer y es maravilloso ver tus logros siendo tan pequeño por tí lucharé día a día Eres la razón de mi existir, la persona mas importante en mi vida. Mil gracias por que muchas cosas de mi cambiaron con tu llegada Imagino como serás de grande y mis ojos se llenan de lágrimas al pasar por mi mente que tu serás una personita que este

siempre llena de amor. Aún recuerdo la primera vez que te tuve entre mis brazos, fue como tocar el cielo en ese preciso instante. Doy gracias a Dios todos los días por poder verte y abrazarte. Espero que algún día llegues a leer esto y te sirva de motivación para que seas el mejor.

A cada integrante de mi familia que me han brindado cariño y confianza en todo momento, cada uno a su manera respaldándome para alcanzar mis objetivos. A mi Padre a quien respeto mucho. Gracias hermanos

A mis grandes amigos: Canchola, Valentin, Juan Pablo (pollo), Pancho (compadre), Barney, Mauricio, Abel, Santiago Lagrima, Alfil por su invaluable cariño afecto y respaldo pero sobre todo por esos inolvidables momentos que hemos pasado juntos disfrutando de la vida y que siempre creyeron en mi.

A mi buen amigo Salvador que siempre me levantaba para continuar con este trabajo y que estuvimos siempre juntos hasta el final.

AL Dr. Jesús Torres por su gran apoyo y motivación para llevar a cabo este trabajo y lograr concluirlo.

Al Ing. Portillo y al grupo ACEA por todo el apoyo que nos brindaron.

Y por último pero no por eso menos importante a mi querida UNAM, la llevo siempre en mi corazón, le doy las gracias por acogerme 5 años, los mejores de mi vida es para mi un honor haber sido universitario y decir con orgullo PROPIEDAD PUMAS.

INDICE

Introducción.....	4
Capitulo I: Generalidades.....	10
1) Fundamentos de transferencia de calor.....	11
1.1) Introducción.....	11
1.2) Transferencia de calor por conducción.....	12
1.3) Conductividad térmica.....	15
1.4) Transferencia de calor por convección.....	20
1.5) Transferencia de calor por radiación.....	23
1.6) Procesos de evaporación en la atmósfera.....	25
1.7) Humidificación.....	27
1.8) Definiciones en la interacción Aire-Agua.....	28
Capitulo II: Evaporación.....	32
2) Evaporación.....	33
2.1) Mecanismos de evaporación.....	33
2.1.2) Características del líquido.....	34
2.1.3) Clasificación del equipo de vaporización.....	35
2.1.4) Evaporadores para plantas de fuerza.....	36
2.1.5) Funcionamiento de evaporadores tubulares.....	37
2.1.6) Economía de un evaporador.....	38
2.1.7) Balance de entalpía para un evaporador de simple efecto.....	38
2.1.8) Evaporación de múltiple efecto.....	38
2.1.9) Operación de un proceso al vacío.....	41
2.2) Evaporación Química.....	41

2.2.1) Evaporadores Químicos.....	43
-----------------------------------	----

Capitulo III: Sistemas de Evaporación Propuestos.....50

Introducción.....51

3.1.1) Criterios para la selección y diseño de un evaporador.....	51
3.1.2) Descripción del evaporador de tubos horizontales.....	54
3.1.3) Descripción general.....	55
3.1.4) Descripción del proceso.....	55
3.1.5) Evaporador de tubos horizontales piloto.....	56
3.1.6) Datos experimentales obtenidos en el evaporador de tubos horizontales.....	59
3.1.7) Esquema representativo del evaporador piloto y balances de materia y energía.....	64
3.2) Descripción del Invernadero.....	77
3.2.1) Introducción.....	77
3.2.2) Importancia del invernadero.....	79
3.1.2) Descripción del invernadero piloto.....	81

Capitulo IV: Sistema Propuesto.....92

4.1) Invernadero Batisierra.....	93
4.2) Generalidades del Invernadero Batisierra.....	94
4.3) Descripción del invernadero.....	95
4.4) Descripción general.....	95
4.5) Balance de materia y energía para el invernadero.....	101

Capitulo V: Normatividad.....	102
5.1) Introducción.....	103
5.2) Normas Oficiales.....	105
Anexos.....	110
Conclusiones.....	111
Bibliografía.....	112

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

La **contaminación** del medio ambiente constituye uno de los problemas críticos en el mundo y es por ello que ha surgido la necesidad de la toma de conciencia, la búsqueda de alternativas para su solución; mientras que el de **energía** es el termino clave de la economía mundial, por lo que a los actuales procesos se les debe de aplicar una auditoria energética y ambiental, para determinar las áreas en donde se puede hacer una mejoría en el uso eficiente de la energía y reducir agentes contaminantes con el fin de ahorrar energía y reducir los costos de operación de los procesos, así como procurar el cuidado del medio ambiente.

Debido a que en muchos procesos industriales existen altas temperaturas y presiones así como sistemas que consumen grandes cantidades de energía para llevar a cabo sus funciones, resultan ser buenos candidatos para recuperar energía de calidad intermedia y baja, con el fin de ser utilizada en otros sistemas, o para regenerarla y mejorar la eficiencia básica del sistema.

Pero no solo el ahorro de energía es el único problema que se presenta en la actualidad, conforme la civilización se desarrolla aumentan las necesidades de adquirir diversos productos y con ello también se incrementan el número de industrias que compiten para producir esas satisfacciones.

Desafortunadamente, la gran mayoría no cuenta con programas que contemplen cómo manejar los desechos que eliminan en sus procesos de fabricación y al no contar con plantas de tratamiento depositan sus residuos, muchas veces tóxicos, al drenaje o a cuerpos de agua que se afectan gravemente, al contener estos.

Algunas industrias son responsables por contaminar el agua con sustancias tóxicas, en ocasiones mortales, como el plomo, mercurio, cromo, cadmio, arsénico, petróleo, etcétera.

Las industrias que mayor impacto ambiental ocasionan son:

1. Cemento
2. Celulosa y papel
3. Textil
4. Cerámica y minerales no metálicos
5. Metálica ferrosa
6. Química
7. Alimentos y bebidas
8. Metálica no ferrosa
9. Maquinaria y equipo
10. Vidrio
11. Plásticos y Hules.

Referente a los desechos sólidos, diversos estudios realizados por SEDESOL (Secretaría de Desarrollo Social), demuestran que en 1950 se producía sólo 5% de basura no degradable y para 1990 se incrementó a 40.5%.

Además, la mayoría de las industrias, que suman casi 173 mil, generan diariamente 460 mil toneladas de residuos, de los cuales aproximadamente 15 mil toneladas son peligrosos.

La cantidad de residuos industriales sólidos (en toneladas diarias) producidos por algunas industrias en 1991, fueron:

- *Industria minera 337 mil 500*
- *Industria química 81 mil*
- *Agroindustria 31 mil 500*

Los recursos hidrológicos incluyen las aguas interiores o continentales, de agua dulce como ríos o lagos, y las oceánicas, que abarcan el medio marino y

costero. Ambos tipos son susceptibles de contaminación por la gran cantidad de desechos que se depositan directamente en ellos o de forma indirecta cuando son arrastrados por la lluvia.

En México, los recursos mencionados están formados por ríos, lagos, lagunas, aguas subterráneas y pluviales (de lluvia). La mayor parte del agua utilizada procede de los ríos, luego de las presas y en menor grado de los mantos subterráneos, lagos y lagunas.

Sin embargo, estos recursos de agua no están distribuidos con uniformidad en el país, ya que en muchas zonas la escasez de dicho elemento se ha convertido en un problema muy grave.

En cuanto a los usos que tiene el agua, de las subterráneas, la mayor parte se utiliza para riego, esto es, cerca del 70% y de las superficiales aproximadamente, 65% es empleada para generar energía eléctrica.

La obtención y utilización del agua en México, ha aumentado enormemente como consecuencia del crecimiento poblacional y el incremento de las actividades industriales y por tanto, también ha aumentado el volumen de aguas residuales, es decir, aquellas que ya se emplearon y que se vierten al drenaje o al suelo.

La contaminación del agua se debe en gran medida a las diversas actividades industriales, las prácticas agrícolas y ganaderas, así como a los residuos domésticos o escolares en general y que al vertirse en ella modifican su composición química haciéndola inadecuada para el consumo, riego o para la vida de muchos organismos.

Se puede clasificar en dos grupos los contaminantes del agua: orgánicos e inorgánicos.

Los primeros están formados por desechos materiales (restos de comida, cáscaras, etc.) generados por seres vivos. Asimismo, se consideran contaminantes orgánicos los cadáveres y el excremento. Los segundos son los contaminantes procedentes de aguas negras arrojadas por las casas habitación, industrias o los agricultores.

De esta forma se nos presenta el problema de la necesidad de mantener y ampliar nuestras actividades económicas por el significado social que ellas tienen en la generación de riquezas; pero al mismo tiempo debemos tomar conciencia sobre la contaminación ambiental que éstas causan, para buscar soluciones y mantener el equilibrio ecológico y ambiental.

Tal es el caso de Petroquímica Pennwalt que a venido procesando normalmente sus productos. De estos procesos viene obteniendo como residuo entre 15 y 20 m³ de agua contaminada por día, con diversos componentes, principalmente sales, esta agua residual proviene de su planta de tratamiento obteniendo como resultado una agua que cumple con las normas para su descarga, es decir DBO* (La demanda bioquímica de oxígeno) y DQO** (La demanda química de oxígeno) sin embargo muy alta en contenido de sales totales aproximadamente entre el 6% y 7% además de VOCs (Compuestos orgánicos volátiles) y fuertes olores.

Debido a esto, grupos ambientalistas locales se han venido manifestando a las puertas de la planta e inclusive han tratado de impedir la operación de la misma.

Petroquímica Pennwalt preocupado por atender dichas demandas ha iniciado negociaciones con dichos grupos y la SEMARNAP para continuar sus operaciones en su planta petroquímica comprometiéndose a cero descargas de aguas residuales por lo que es imperativo encontrar un método para eliminar dichas aguas residuales.

DBO*: es la cantidad de oxígeno necesaria para eliminar la materia orgánica contenida en el agua por procesos biológicos aerobios, se expresa en mg/L de O₂.

DQO**: es el mismo concepto cambiando procesos biológicos por químicos.

En fecha reciente nos fue planteada su problemática del agua residual proponiéndose los procesos ecológicos-naturales y los procesos térmicos. El primero consistiría en realizar la evaporación por medios naturales controlados y el segundo en la evaporación total del agua residual mediante un sistema de evaporación utilizando energía térmica.

Cabe mencionar que la contaminación del medio ambiente y el uso eficiente de la energía son problemas industriales que plantean soluciones diversas, por lo que en esta tesis se abordará el problema relativo a las corrientes líquidas de descarga de las aguas de desecho de la Planta Pennwalt, ubicada en Coatzacoalcos Ver.

Por lo tanto el objetivo de esta tesis pretende realizar un análisis comparativo entre un evaporador de tubos horizontales utilizando vapor como medio de calentamiento (proceso térmico), y un invernadero agrícola aprovechando la energía solar (proceso ecológico natural). El primero consiste en introducir vapor en el interior de los tubos horizontales haciéndolos calentar, de manera que por medio de un tubo de alimentación; se irriga la solución problema en dichos tubos formando una película descendente sobre la superficie exterior de estos, haciendo que esta se evapore (solución problema). El segundo consiste en drenar la solución problema en estanques tipo alberca que se encuentran en el

interior del invernadero, y dejar que en un día solar la solución se evapore por medios naturales. Posteriormente realizaremos un estudio económico a 10 años para determinar la factibilidad técnico-económica más viable, que permita un máximo ahorro tanto económico como energético y que cumpla con la restricción de cero descargas, sin olvidar el buen trato al medio ambiente.

CAPITULO I

GENERALIDADES

1) FUNDAMENTOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

1.1) INTRODUCCIÓN

La transferencia de calor es aquella ciencia que busca predecir la transferencia de energía que puede ocurrir entre cuerpos materiales, como resultado de una diferencia de temperatura. La termodinámica enseña que esta transferencia de energía se define como calor. La ciencia de la transferencia de calor no sólo trata de explicar cómo puede ser transferida la energía calorífica, sino también trata de predecir la rapidez a la que se realizará este intercambio bajo ciertas condiciones especificadas. El hecho de que un régimen de transferencia de calor sea el objetivo deseado de un análisis, señala la diferencia entre la transferencia de calor y la termodinámica. La termodinámica se ocupa de sistemas en equilibrio; se puede utilizar para predecir la cantidad de energía requerida para pasar un sistema de un estado de equilibrio a otro; no puede usarse para predecir qué tan rápido se realizará un cambio, ya que el sistema no se encuentra en equilibrio durante el proceso. La transferencia de calor completa al primer y segundo principios de la termodinámica, al proporcionar reglas experimentales adicionales que se pueden utilizar para establecer rapidezces de transferencia de energía. Tal como en la ciencia de la termodinámica, las reglas experimentales utilizadas como base del tema de la transferencia de energía son muy simples y se les puede ampliar con facilidad para que abarquen diversas situaciones prácticas.

Como un ejemplo de los diferentes tipos de problemas que son tratados por la termodinámica y la transferencia de calor, considérese el enfriamiento de una barra de acero caliente que se coloca en un recipiente con agua. La termodinámica puede usarse para predecir la temperatura de equilibrio final de la combinación de la barra de acero y agua. La termodinámica no nos dirá cuánto tardará en alcanzar esta condición de equilibrio o cuál será la temperatura de la barra después de pasado un cierto tiempo antes que se

alcance la condición de equilibrio. La transferencia de calor puede usarse para predecir la temperatura tanto de la barra como del agua, en función del tiempo.

1.2) Transferencia de calor por conducción

La experiencia ha demostrado que cuando existe un gradiente de temperatura en un cuerpo, hay una transferencia de energía de la región de alta temperatura a la de baja temperatura. Decimos que la energía es transferida por conducción y que la rapidez de transferencia de energía por unidad de área es proporcional al gradiente normal de temperatura:

$$\frac{q}{A} \sim \frac{\partial T}{\partial x}$$

Cuando se inserta la constante de proporcionalidad,

$$q = -\kappa A \frac{\partial T}{\partial x} \dots\dots(1.2.a)$$

en donde q es la rapidez de transferencia de calor y $\delta T/\delta x$ es el gradiente de temperatura en la dirección del flujo de calor. A la constante positiva κ se le llama la conductividad térmica del material, y el signo menos se inserta para que se satisfaga el segundo principio de la termodinámica, es decir, el calor deberá fluir hacia abajo en la escala de temperatura, como se encuentra indicado en el sistema de coordenadas de la Fig. (1.2.b). A la Ec. (1.2.a) se le llama la ley de conducción de calor de **Fourier** en honor al físico matemático francés Joseph Fourier, quien realizó importantes contribuciones en el tratamiento analítico de la transferencia de calor por conducción. Es importante observar que la Ec. (1.2.a) es la igualdad que define la conductividad térmica y que en un sistema de

unidades típico en el que el flujo de calor es expresado en watts, κ tiene las unidades de watts por metro por grado Celsius.

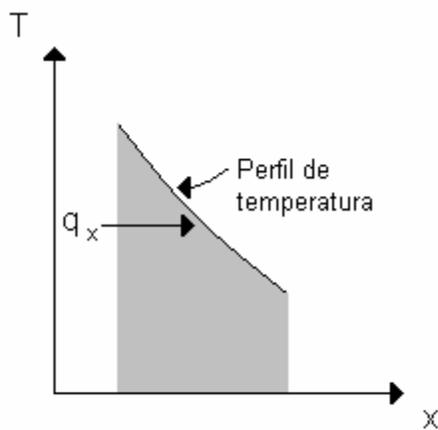


Figura (1.2.b)
Esquema que muestra
la dirección del flujo
de calor

Ahora nos planteamos el problema de determinar la ecuación básica que gobierna la transferencia de calor en un sólido, utilizando la Ec. (1.2.a) como punto de partida.

Considérese el sistema unidimensional que aparece en la figura (1.2.c). Si el sistema se encuentra en un estado estacionario, es decir, si la temperatura no cambia con el tiempo, entonces el problema es simple y sólo necesitamos integrar la Ec. (1.2.a) y sustituir los valores adecuados para resolverla para la cantidad deseada. No obstante, si la temperatura del sólido está cambiando con el tiempo, o si hay fuentes de calor o sumideros dentro del sólido, la situación es más compleja. Consideramos el caso general en el que la temperatura puede estar cambiando con el tiempo y dentro del cuerpo pueden haber fuentes de calor. Para el elemento de espesor dx se puede realizar el siguiente balance de energía:

$$\begin{aligned} &\text{Energía conducida en la cara izquierda} + \text{calor generado dentro del elemento} \\ &= \text{cambio en la energía interna} + \text{energía conducida fuera de la cara derecha} \end{aligned}$$

Estas cantidades de energía están dadas de la siguiente manera:

$$\text{Energía en la cara izquierda} = q_x = -\kappa A \frac{\partial T}{\partial x}$$

$$\text{Energía generada dentro del elemento} = \dot{q} A dx$$

$$\text{Cambio en la energía interna} = \rho c A \frac{\partial T}{\partial \tau} dx$$

$$\text{Energía hacia fuera de la cara derecha} = q_{x+dx} = -\kappa A \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right]_{x+dx}$$

$$= -A \left[\kappa \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\kappa \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx \right]$$

donde \dot{q} = energía generada por unidad de volumen

c = calor específico del material

ρ = densidad

La combinación de los elementos expresados antes nos da

$$-\kappa A \frac{\partial T}{\partial x} + \dot{q} A dx = \rho c A \frac{\partial T}{\partial \tau} dx - A \left[\kappa \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\kappa \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx \right]$$

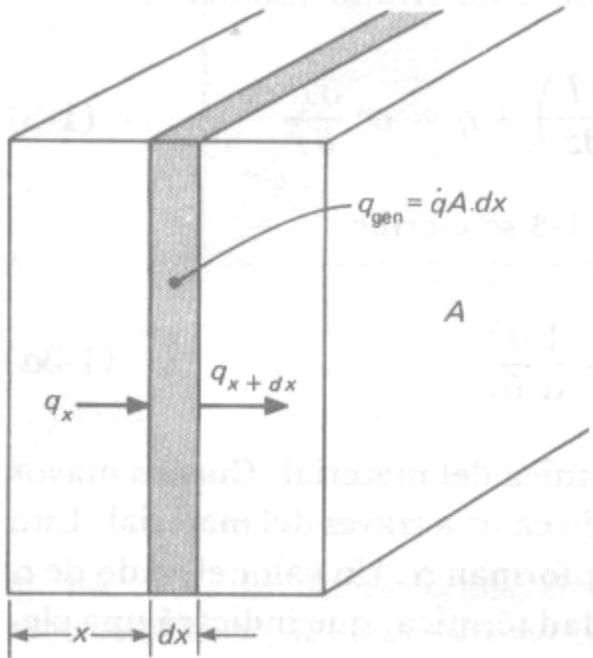


Figura (1.2.c) Volumen elemental para el análisis de la conducción de calor unidimensional.

$$\circ \frac{\partial}{\partial x} \left(\kappa \frac{\partial T}{\partial x} \right) + q = \rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} \dots\dots(1.2.d)$$

Esta es la ecuación de conducción de calor unidimensional.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{q}}{\kappa} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial \tau} \dots\dots(1.2.e)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0 \dots\dots(1.2.f)$$

1.3) Conductividad térmica

La Ec. (1.2.a) es la igualdad que define la conductividad térmica. Basándose en esta definición, se pueden realizar mediciones experimentales para determinar la conductividad térmica de diferentes materiales. Para gases a temperaturas

moderadamente bajas, se pueden usar tratamientos analíticos en la teoría cinética de los gases para predecir de manera exacta los valores observados experimentalmente. En algunos casos, hay teorías útiles para la predicción de la conductividad térmica en sólidos y líquidos, pero en general. Todavía hay muchas preguntas abiertas y conceptos que necesitan ser clasificados.

El mecanismo de la conductividad térmica en un gas es simple. Identificamos la energía cinética de una molécula con su temperatura; así, en una región de alta temperatura, las moléculas tienen velocidades más altas que en una región de temperatura baja. Las moléculas se encuentran en continuo movimiento aleatorio, chocando unas contra otras e intercambiando energía y momento. Las moléculas tienen este movimiento aleatorio exista o no un gradiente de temperatura en el gas. Si una molécula se mueve de una región de alta temperatura a una de baja temperatura, transporta energía cinética a la parte del sistema de baja temperatura y transfiere esta energía a través de colisiones con moléculas de temperatura más baja.

La Tabla 1.3.a contiene una lista de los valores de conductividad térmica para diversos materiales para indicar las órdenes de magnitud relativos que se han de esperar en la práctica. En general, la conductividad térmica depende mucho de la temperatura.

Observamos que la conductividad térmica tiene las unidades de watts por metro por grado Celsius cuando el flujo de calor está expresado en watts. Obsérvese que se incluye una rapidez de calor, y que el valor numérico de la conductividad térmica indica qué tan rápido fluirá en un material dado. ¿Cómo se toma en consideración la rapidez de transferencia de energía en el modelo molecular que acabamos de discutir? Es claro que cuanto más rápido se muevan las moléculas, más rápidamente transportarán energía. Por consiguiente, la conductividad térmica de un gas deberá depender de la temperatura. Un tratamiento analítico simplificado muestra que la conductividad térmica de un gas varía con la raíz cuadrada de la temperatura absoluta. (Se puede recordar

que la velocidad del sonido en un gas varía con la raíz cuadrada de la temperatura absoluta; esta velocidad es aproximadamente la velocidad media de las moléculas). En la Figura (1.3.c) se muestra la conductividad térmica de algunos gases típicos. Para la mayor parte de los gases a presiones moderadas, la conductividad térmica es una función de la temperatura. Esto quiere decir que los datos de gases para 1 atm (atmósfera), pueden utilizarse para un amplio intervalo de presiones. Cuando la presión del gas se torna del orden de su presión crítica o, con mayor generalidad, cuando se encuentra un comportamiento no ideal del gas, se deberán consultar otras fuentes para los datos sobre conductividad térmica.

El mecanismo físico de la conducción de energía térmica en líquidos es cualitativamente el mismo que en los gases; sin embargo, la situación es mucho más compleja ya que las moléculas se encuentran más cerca unas de otras y los campos de fuerza molecular ejercen una fuerte influencia sobre el intercambio de energía en el proceso de colisión. En la Fig. (1.3.d) se muestra la conductividad térmica de algunos líquidos típicos.

La energía térmica puede ser conducida en los sólidos de dos modos: vibración de red y transporte por medio de electrones. En los buenos conductores eléctricos un gran número de electrones libres se mueven en la estructura de la red del material. De la misma manera que estos electrones pueden transportar carga eléctrica, también pueden llevar energía térmica de una región de alta temperatura a una de baja temperatura, como ocurre en los gases. De hecho, con frecuencia nos referimos a estos electrones como gas de electrones. La energía también se puede transmitir como energía vibracional en la estructura de red del material. No obstante, en general, este último modo de

Tabla (1.3.b) Conductividad térmica de diversos materiales en 0 °C

Material	Conductividad térmica	
	k	
	W / m °C	Btu / h * pie * ° F

Metales:		
Plata (pura)	410	237
Cobre (puro)	385	223
Aluminio (puro)	202	117
Níquel (puro)	93	54
Hierro (puro)	73	42
Acero al carbón, 1% C	43	25
Plomo (puro)	35	20.3
Acero cromo-níquel (18% Cr, 8% Ni)	16.3	9.4
Sólidos no metálicos:		
Cuarzo, paralelo al eje	41.6	24
Magnesita	4.15	2.4
Mármol	2.08-2.94	1.2-1.7
Arena	1.83	1.06
Vidrio de ventana	0.78	0.45
Arce o roble	0.17	0.096
Aserrín	0.059	0.034
Fibra de vidrio	0.038	0.022
Líquidos:		
Mercurio	8.21	4.74
Agua	0.556	0.327
Amoníaco	0.54	0.312
Aceite lubricante, SAE 50	0.147	0.085
Freón 12, CCl ₂ F ₂	0.073	0.042
Gases:		
Hidrógeno	0.175	0.101
Helio	0.141	0.081
Aire	0.024	0.0139
Vapor de agua (saturado)	0.0206	0.0119
Bióxido de carbono	0.0146	0.00844

transferencia de energía no es tan grande como el transporte por electrones y por esta razón los buenos conductores eléctricos son casi siempre buenos conductores de calor, a saber cobre, aluminio y plata, y los aislantes eléctricos son casi siempre buenos aislantes del calor.

Algunos de los valores típicos son 0.038 W / m °C para la fibra de vidrio y 0.78 W / m °C para el vidrio de ventana. A altas temperaturas, la transferencia de energía a través de materiales aislantes puede involucrar varios modos: conducción a través de material sólido fibroso o poroso; conducción a través del

aire atrapado en los espacios huecos; y radiación a temperaturas suficientemente altas.

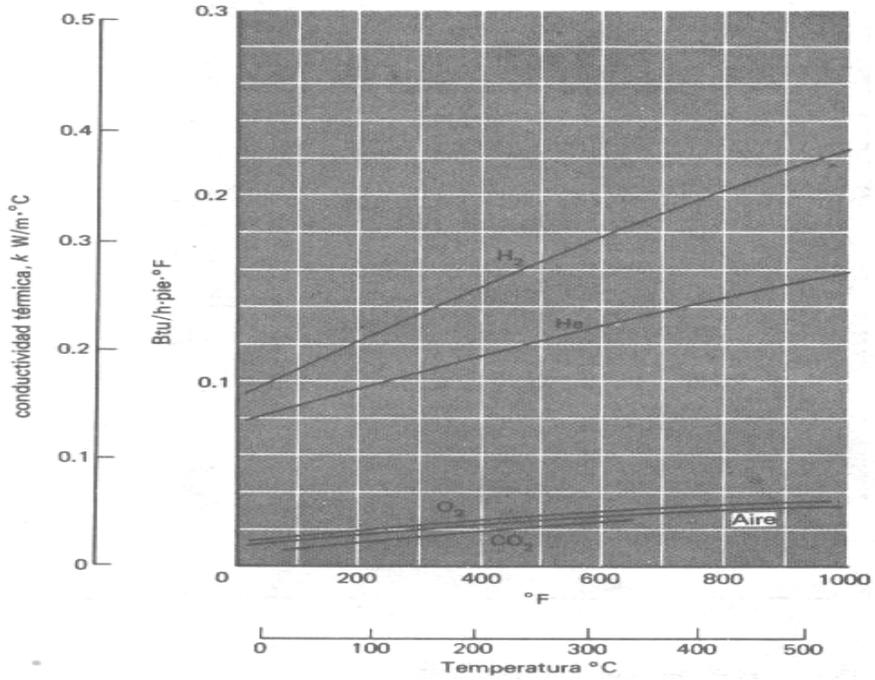


Figura (1.3.c) Conductividad térmica de algunos gases típicos ($1 \text{ W} / \text{m}^{\circ}\text{C} = 0.5779 \text{ Btu} / \text{h pie}^{\circ}\text{F}$)

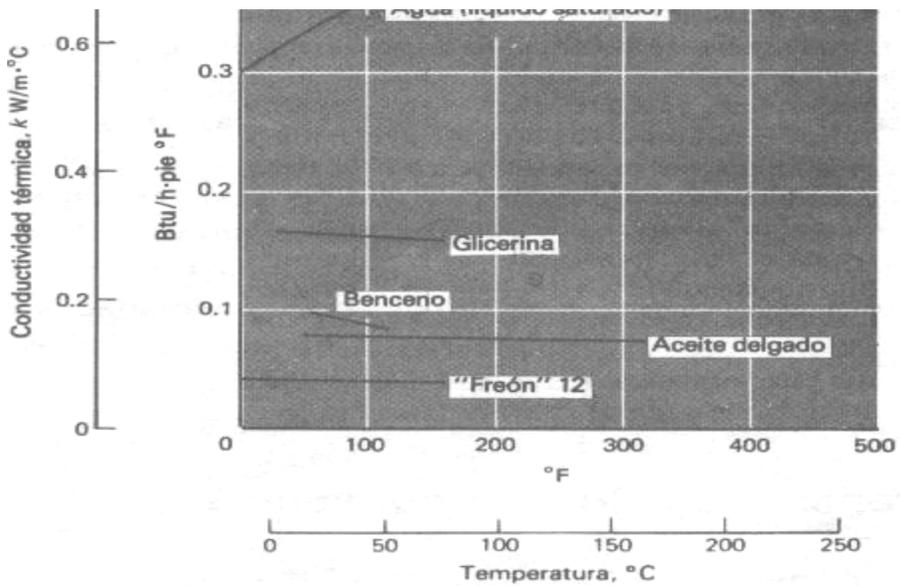


Figura (1.3.d) Conductividad térmica de algunos líquidos típicos

Un problema técnico importante es el almacenamiento y transporte de líquidos criogénicos como el hidrógeno durante periodos prolongados de tiempo. Estas aplicaciones han conducido al desarrollo de superaislantes para su uso en temperaturas muy bajas (tan bajas como $-250\text{ }^{\circ}\text{C}$). El más eficiente de estos superaislantes consiste en múltiples capas de materiales muy reflejantes separados por separadores aislantes. Se hace vacío en el sistema completo para minimizar la conductividad por aire, y es posible obtener conductividades térmicas tan bajas como $0.3\text{ m W / m }^{\circ}\text{C}$. En la figura (1.3.e) se proporciona un útil compendio de las conductividades térmicas de materiales aislantes a temperaturas criogénicas.

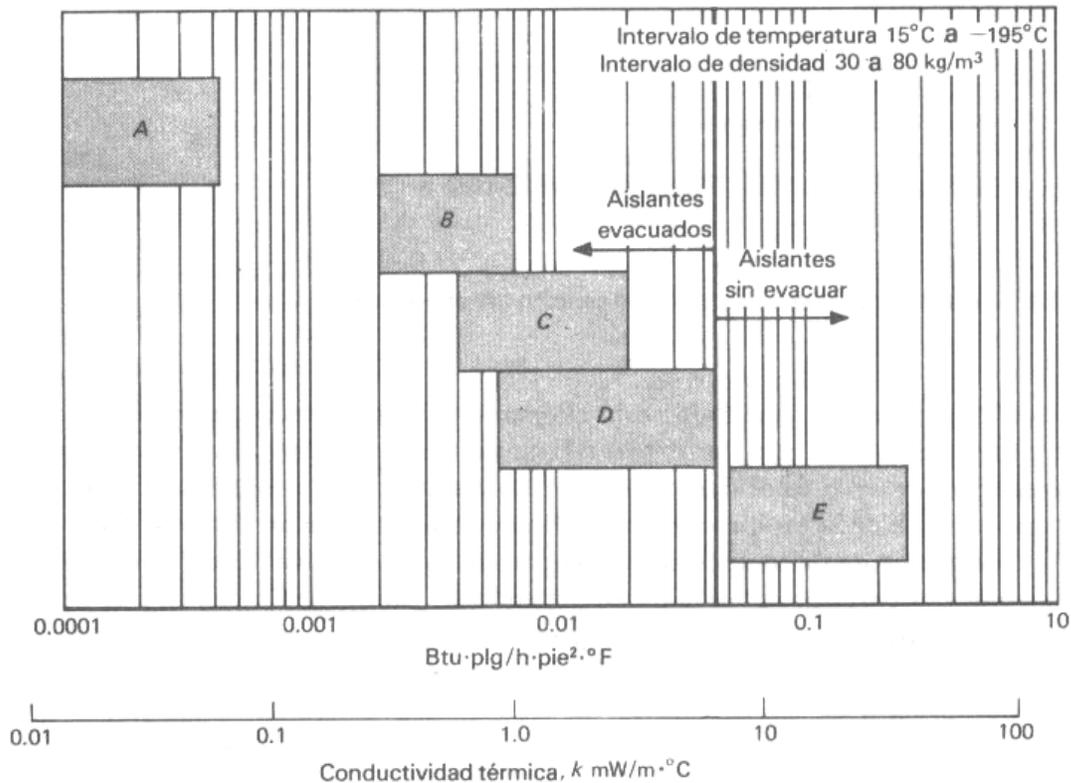


Figura (1.3.e) Conductividad térmica aparente de un material aislante criogénico típico: (a) aislantes multicapas; (b) polvos opacados; (c) fibras de vidrio; (d) polvos; (e) espumas, polvos y fibras ($1\text{ Btu plg / h pie}^2\text{ }^{\circ}\text{F} = 144\text{ m W / m }^{\circ}\text{C}$).

1.4) Transferencia de calor por convección

Sabemos muy bien que una placa de metal caliente se enfría con mayor rapidez cuando se coloca frente a un ventilador, que cuando se le expone a un aire en reposo. Decimos que el calor se disipó por convección y llamamos al proceso transferencia de calor por convección. El término convección proporciona al lector una noción intuitiva sobre el proceso de transferencia de calor; no obstante, esta noción intuitiva deberá ser ampliada para que nos permita llegar a un tratamiento analítico adecuado del problema.

Considérese la placa caliente que se muestra en la Figura (1.4.a). La temperatura de la placa es T_w , y la temperatura de fluido es T_∞ . La velocidad de flujo aparecerá como se muestra, siendo reducida a cero en la placa como resultado de la acción de viscosidad. Ya que la velocidad de la capa de fluido sobre la pared será cero, el calor deberá transferirse en aquel punto sólo por conducción. De este modo podríamos calcular la transferencia de calor, utilizando la Ec. 1.2.a con la conductividad térmica y el gradiente de temperatura del fluido sobre la pared. ¿Por qué, entonces, si en esta capa el calor fluye por conducción, hablamos de transferencia de calor por convección y necesitamos considerar la velocidad del fluido? La respuesta es que el gradiente de temperatura depende de la rapidez a la que el fluido conduce el calor; una velocidad alta produce un gradiente de temperatura más grande, y viceversa. Por tanto, el gradiente de temperatura sobre la pared depende del campo de flujo, y en nuestro último análisis debemos desarrollar una expresión que relacione las dos cantidades. Sin embargo, debe recordarse que el mecanismo físico de la transferencia de calor sobre la pared es un proceso de conducción.

Para expresar el efecto total de la convección, utilizamos la ley de enfriamiento de Newton:

$$q = hA(T_w - T_\infty) \dots \dots \dots (1.4.a)$$

Aquí la rapidez de transferencia de calor está relacionada con la diferencia de temperatura total entre la pared y el fluido, y el área de la superficie A. A la cantidad h se le llama el coeficiente de transferencia de calor por convección, y la Ec. (1.4.a) es la ecuación que lo define. Para algunos sistemas se puede realizar un cálculo analítico de h . Para situaciones complejas se deberá determinar experimentalmente. En algunas ocasiones se llama *conductancia de película* al coeficiente de transferencia de calor debido a su relación con el proceso de conducción en la delgada capa estacionaria de fluido sobre la superficie de la pared. En la Ec. (1.4.a) observamos que las unidades de h son watts por metro cuadrado por grado Celsius cuando el flujo de calor se expresa en watts. Este es el conjunto de unidades más utilizado.

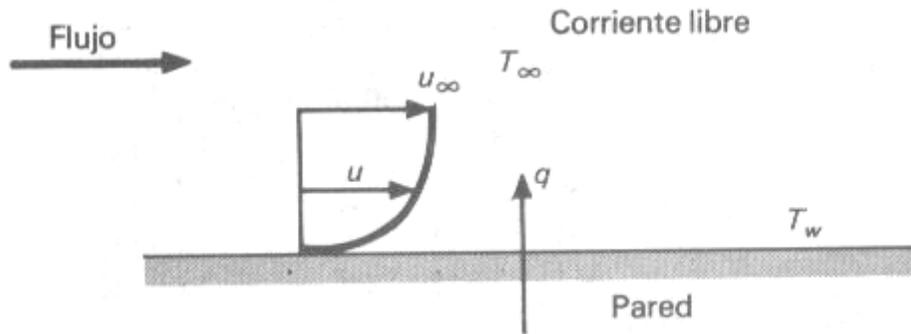


Figura (1.4.a) Transferencia de calor por convección en una placa.

Tomando en cuenta el estudio precedente, podemos anticipar que la transferencia de calor por convección, además de su dependencia de las propiedades térmicas del fluido (conductividad térmica, calor específico, densidad), tendrá cierta dependencia de la viscosidad del fluido. Esto era de esperarse porque la viscosidad influye el perfil de velocidad y, de manera

correspondiente, la rapidez de transferencia de energía en la región cercana a la pared.

Si se expusiera una placa caliente al aire ambiente de una habitación sin una fuente de movimiento externa, se experimentaría un movimiento del aire como resultado de los gradientes de densidad cerca de la placa. A esto le llamamos convección *natural o libre*, en oposición a la convección forzada, que ocurre en el caso en que el ventilador sopla aire sobre la placa. Los fenómenos de ebullición y condensación también se agrupan bajo el tema general de transferencia de calor por convección. En la Tabla (1.4.c) se encuentran indicados los intervalos aproximados de los coeficientes de transferencia de calor por convección.

Tabla (1.4.c) Valores aproximados de los coeficientes de transferencia de calor por convección

Modo	h	
	W / m ² °C	Btu / h * pie ² * °F
Convección libre, ΔT = 30 °C		
Placa vertical 0.3 m (1 pie) de altura en el aire	4.5	0.79
Cilindro horizontal, 5 cm de diámetro, en el aire	6.5	1.14
Cilindro horizontal, 2 cm de diámetro, en agua	890	157
Convección forzada		
Flujo de aire a 2 m/s sobre placa cuadrada de 0.2 m	12	2.1
Flujo de aire a 35 m/s sobre placa	75	13.2

cuadrada a 0.75 m		
Aire a 2 atm soplando en tubo de 2.5 cm de diámetro a 10 m/s	65	11.4
Agua a 0.5 kg/s fluyendo en tubo de 2.5 cm de diámetro	3500	616
Flujo de aire a través de un cilindro de 5 cm de diámetro con velocidad de 50 m/s	180	32
Agua hirviendo		
En una piscina o recipiente	2500-35000	440-6200
Fluyendo en un tubo	5000-100000	880-17600
Condensación de vapor de agua, 1 atm		
Superficies verticales	4000-11300	700-2000
Tubos horizontales al exterior	9500-25000	1700-4400

1.5) Transferencia de calor por radiación

En contraste con los mecanismos de conducción y convección, en donde está involucrada la transferencia de energía a través de un medio material, el calor también se puede transferir a regiones donde existe el vacío perfecto. En este caso, el mecanismo es la radiación electromagnética. Limitaremos nuestro estudio a la radiación electromagnética que es propagada como resultado de una diferencia de temperaturas; a esto se le llama radiación térmica.

Consideraciones termodinámicas muestran que un radiador ideal, o *cuerpo negro*, emitirá energía a una rapidez proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta del cuerpo. Cuando dos cuerpos intercambian calor por radiación, el intercambio de calor neto es entonces proporcional a las diferencias en T^4 . Así.

$$q = \sigma A (T_1^4 - T_2^4) \dots \dots \dots (1.5.a)$$

donde σ es la constante de proporcionalidad y se le llama constante de Stefan - Boltzmann con el valor de $5.669 \cdot 10^{-8} \text{ W / m}^2 \text{ K}^4$. A la ecuación (1.5.a) se le

llama la ley de radiación térmica de Stefan – Boltzmann, y se aplica sólo a los cuerpos negros. Es importante observar que esta ecuación únicamente es válida para la radiación térmica; otros tipos de radiación electromagnética no pueden ser tratados de una manera tan simple.

Hemos mencionado que un cuerpo negro irradia energía de acuerdo con la ley T^4 . A tales cuerpos les llamamos negros porque las superficies negras, tales como un pedazo de metal cubierto con carbón negro, se aproximan a este tipo de comportamiento. Otros tipos de superficies, como una brillante superficie pintada o una placa de metal pulida, no irradian tanta energía como un cuerpo negro; sin embargo, la radiación total emitida por estos cuerpos, por lo general, sigue la proporcionalidad de T^4 . Para tomar en cuenta la naturaleza “gris” de estas superficies introducimos otro factor en la Ec. (1.5.a), llamado la emisividad ϵ , que relaciona la radiación de la superficie “gris” con la de una superficie negra ideal. Además, debemos tomar en cuenta el hecho de que no todas las radiaciones que dejan una superficie alcanzarán la otra superficie, ya que la radiación electromagnética viaja en línea recta y algunas se perderán en los alrededores. Por consiguiente, para tomar en cuenta ambas situaciones, introducimos dos nuevos factores en la Ec. (1.5.a)

$$q = F_{\epsilon} F_G \sigma A (T_1^4 - T_2^4) \dots \dots \dots (1.5.b)$$

Donde F_{ϵ} es la función de emisividad y F_G es la función geométrica de “factor de vista”. Estas funciones generalmente no son independientes unas de otras como se indica en la Ec. (1.5.b).

Los fenómenos de transferencia de calor por radiación pueden ser excesivamente complejos, y los cálculos son raras veces tan simples como lo sugiere la Ec. (1.5.b).

1.6) Procesos de evaporación en la atmósfera

En la atmósfera, las continuas evaporaciones y condensaciones de agua del suelo, océanos y lagos influyen en todas las formas de vida y producen muchas de las variaciones diarias de clima que gobiernan el medio ambiente en la tierra. Estos procesos son muy complicados porque en la práctica son gobernados por importantes corrientes de convección atmosféricas de difícil descripción analítica.

1. El proceso de difusión comprende movimientos turbulentos en contraflujo considerables, de manera que el coeficiente de difusión D_w puede variar en forma significativa con la altura z .

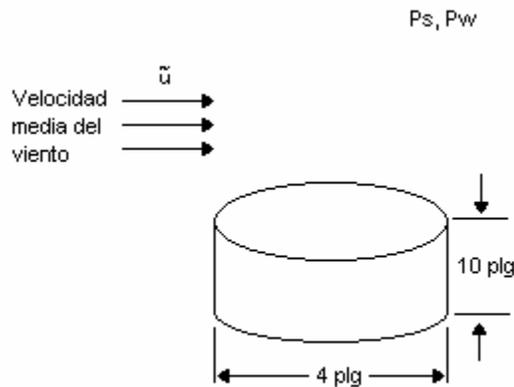


Figura (1.6.a) Crisol estándar tipo A para medir la evaporación.

P_s = presión de vapor a saturación a la temperatura del aire de bulbo seco

P_w = presión de vapor real del aire bajo condiciones de temperatura y humedad

2. El aire muy rara vez se encuentra inmóvil y las corrientes de aire contribuyen en forma sustancial en la rapidez de evaporación.

La solución a un problema complicado de este tipo con frecuencia se obtiene recurriendo a medidas cuidadosamente controladas en la búsqueda de una relación empírica para predecir las rapidezces de evaporación.

Los modelos matemáticos intentan predecir la cantidad de gas o vapor que se desprende de un derrame de líquido en determinadas condiciones de presión, temperatura, velocidad del viento, tipo de suelo, etc.

Se pueden almacenar sustancias líquidas a temperatura ambiente (líquidos no hirvientes), que al derramarse forman un charco de líquido que se evapora. También se pueden almacenar sustancias gaseosas en forma líquida por dos procedimientos: almacenándolos a temperatura ambiente (entre 5 y 15 °C aproximadamente) y a una presión mayor que la presión atmosférica (caso de los gases licuados bajo presión), o bien almacenándolos a presión atmosférica pero enfriándolos hasta su temperatura de ebullición (gases licuados por refrigeración).

Los casos más utilizados en la industria son los almacenamientos de gases licuados bajo presión a temperatura por encima de su temperatura de ebullición a presión atmosférica. Los almacenamientos de gases licuados de petróleo (butano, propano, etc.), como otros tipos de gases muy utilizados en la industria: cloro, amoníaco, oxígeno, etc. son en su inmensa mayoría de este tipo.

Por tanto, hay que distinguir varios casos posibles de vaporización de líquidos:

1. Líquidos sobrecalentados: son los procedentes de líquidos almacenados bajo presión a temperatura mayor que su temperatura de ebullición normal.
2. Líquidos hirvientes: son aquéllos procedentes de gases licuados por enfriamiento.
3. Líquidos no hirvientes: sustancias líquidas almacenadas a temperatura ambiente.

En general, los procesos de transferencia de calor que se producen entre un charco de líquido y el medio hacen que la sustancia pase a la fase de vapor en

un tiempo determinado. El esquema simplificado de abajo presenta dichos procesos.



1.7) Humidificación

La humidificación es una operación unitaria en la que tiene lugar una transferencia simultánea de materia y calor sin la presencia de una fuente de calor externa. De hecho siempre que existe una transferencia de materia se transfiere también calor. Pero para operaciones como extracción, adsorción, absorción o lixiviación, la transferencia de calor es de menor importancia como mecanismo controlante de velocidad frente a la transferencia de materia. Por otro lado, en operaciones como ebullición, condensación, evaporación o cristalización, las transferencias simultáneas de materia y calor pueden determinarse considerando únicamente la transferencia de calor procedente de una fuente externa.

La transferencia simultánea de materia y calor en la operación de humidificación tiene lugar cuando un gas se pone en contacto con un líquido puro, en el cual es prácticamente insoluble. Este fenómeno nos conduce a diferentes aplicaciones además de la humidificación del gas, como son su deshumidificación, el

enfriamiento del gas (acondicionamiento de gases), el enfriamiento del líquido, además de permitir la medición del contenido de vapor en el gas.

A grandes rasgos, el proceso que tiene lugar en la operación de humidificación es el siguiente:

- una corriente de agua caliente se pone en contacto con una de aire seco (o con bajo contenido en humedad), normalmente aire atmosférico.
- parte del agua se evapora, enfriándose así la interfase.
- el seno del líquido cede entonces calor a la interfase, y por lo tanto se enfría.
- a su vez, el agua evaporada en la interfase se transfiere al aire, por lo que se humidifica.

En la deshumidificación, agua fría se pone en contacto con aire húmedo. La materia transferida entre las fases es la sustancia que forma la fase líquida, que dependiendo de cómo estemos operando, o se evapora (humidificación), o bien se condensa (deshumidificación.)

Existen diferentes equipos de humidificación, entre los que destacamos las torres de enfriamiento por su mayor aplicabilidad. En ellas, el agua suele introducirse por la parte superior en forma de lluvia provocada, y el aire fluye en forma ascendente, de forma natural o forzada. En el interior de la torre se utilizan rellenos de diversos tipos que favorecen el contacto entre las dos fases.

1.8) Definiciones en la interacción Aire-Agua

Antes de desarrollar las ecuaciones de diseño en una torre de enfriamiento, hemos de definir una serie de variables y conceptos involucrados en la operación de humidificación.

Evapotranspiración: Es especialmente interesante en ecología pues se refiere al conjunto del vapor de agua enviado a la atmósfera en una superficie, y es la suma del agua evaporada directamente desde el suelo y el que las plantas y otros seres vivos emiten a la atmósfera en su transpiración.

Temperatura de bulbo seco: La temperatura de bulbo seco, es la verdadera temperatura del aire húmedo y con frecuencia se le denomina sólo temperatura del aire; es la temperatura del aire que marca un termómetro común.

Temperatura de punto de rocío: La temperatura de punto de rocío, es la temperatura a la cual el aire húmedo no saturado se satura, es decir, cuando el vapor de agua comienza a condensarse, por un proceso de enfriamiento, mientras que la presión y la razón de humedad se mantienen constantes.

Presión de vapor (Pv): La presión de vapor, es la presión parcial que ejercen las moléculas de vapor de agua presentes en el aire húmedo. Cuando el aire está totalmente saturado de vapor de agua, su presión de vapor se denomina presión de vapor saturado (P_{vs}).

Relación de mezcla (W): La razón de humedad del aire, se define como la relación entre la masa de vapor de agua y la masa de aire seco en un volumen dado de mezcla. Algunos autores confunden los términos razón de humedad y humedad absoluta. La humedad absoluta, denominada también densidad del vapor de agua, es la relación entre la masa de vapor de agua y el volumen que ocupa la mezcla de aire seco y vapor de agua.

Humedad absoluta: es la razón másica de vapor de agua respecto al aire seco

$$H = \frac{M_A}{M_B} \frac{P_A}{P - P_A} \quad \frac{\text{kg agua}}{\text{kg aire seco}}$$

M_A : masa molecular del agua; $M_A = 18$ g/mol

M_B : masa molecular del aire; $M_B = 28,9$ g/mol

P_A : presión parcial que ejerce el vapor de agua en la mezcla gaseosa

P : presión total (atmosférica.)

Humedad relativa.- Es la relación entre la cantidad de vapor de agua contenido realmente en el aire estudiado (humedad absoluta) y el que podría llegar a contener si estuviera saturado (humedad de saturación). Indica que tan cerca está el aire de la saturación. Se expresa en un porcentaje. Así, por ejemplo, una humedad relativa normal junto al mar puede ser del 90% lo que significa que el aire contiene el 90% del vapor de agua que puede admitir, mientras un valor normal en una zona seca puede ser de 30%.

Calor específico (C_p): calor necesario para aumentar 1°C a una unidad de masa de una sustancia, a presión constante. Tomamos los valores medios de los calores específicos del agua y del aire entre 0°C y 100°C :

$$C_{p_{\text{aire}}} = C_{p_B} = 1005 \text{ J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$$

$$C_{p_{\text{vapor de agua}}} = C_{p_A} = 1884 \text{ J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$$

$$C_{p_{\text{agua líquida}}} = C_{p_L} = 4180 \text{ J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$$

Calor específico húmedo (C_{p_S}): (es el C_p de la mezcla gaseosa aire-agua):

$$C_{p_S} = C_{p_B} + C_{p_A} \cdot H = 1005 + 1884 \cdot H \text{ [J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})]$$

Diagrama de humedad: también llamado carta psicométrica, permite la obtención mediante lectura directa de la mayoría de las propiedades de las mezclas aire-vapor de agua que son necesarias en los cálculos a realizar en la operación de humidificación, para una presión determinada. En la figura 1.8.a se representa el diagrama de humedad para la presión de 1 atm.

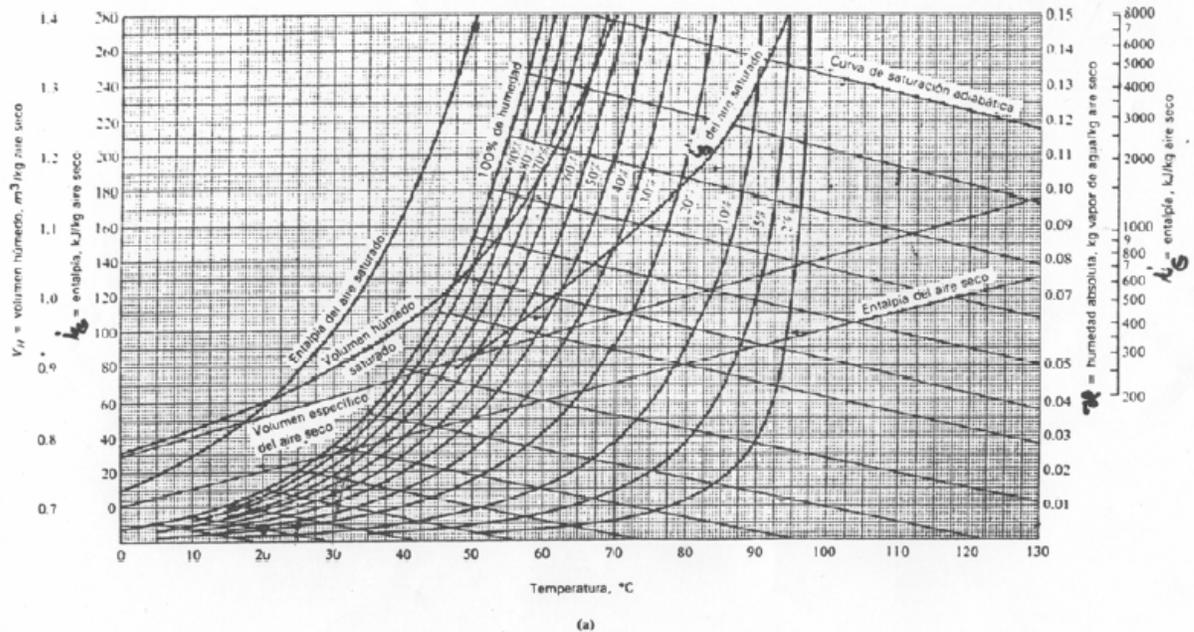


Figura 1.8.a: Diagrama de humedad

La limitación del diagrama de humedad es la curva de saturación. Los puntos representados a la derecha representan mezclas definidas de aire no saturado (a la izquierda se representan mezclas de aire saturado y agua líquida). Las curvas situadas entre el eje de abscisas y la curva de saturación son las líneas correspondientes a diferentes humedades relativas. Las rectas inclinadas con pendiente negativa corresponden a las líneas de temperatura de saturación adiabática, que prácticamente coincide con la temperatura de bulbo húmedo para el sistema aire-agua.

CAPITULO II

EVAPORACIÓN

2) EVAPORACIÓN

2.1) Mecanismos de evaporación

Cuando a través de un tubo fluye vapor de agua y aquel se encuentra sumergido en un recipiente con líquido, se forman pequeñas burbujas de vapor de una manera completamente al azar en la superficie del tubo. El calor que pasa a través de la superficie del tubo donde no se forman burbujas, entra por convección al líquido que lo rodea. Algo del calor del líquido fluye entonces hacia la burbuja, provocando evaporación desde su superficie

interna hacia el interior de ella misma. Cuando se ha desarrollado suficiente fuerza ascensorial entre la burbuja y el líquido, ésta se libera de las fuerzas que la mantienen adherida al tubo y sube a la superficie del recipiente. Para esto, el líquido debe estar más caliente que su temperatura de saturación en la burbuja incipiente. Esto es por que la naturaleza esférica de la burbuja establece fuerzas de superficie en el líquido, de manera que la presión de saturación dentro de la burbuja es menor que la del líquido que la rodea. La temperatura de saturación de la burbuja siendo menor que la del líquido que la rodea, permite el flujo de calor dentro de la burbuja. Los puntos en los que se originan las burbujas depende de la textura de la superficie del tubo, aumentando con la rugosidad.

Es importante mencionar que la tensión superficial del agua a temperatura ordinaria en contra del aire es de 75 dinas/cm. Y la mayoría de las sustancias orgánicas presentan una tensión superficial de 20 a 30 dinas/cm. La tensión superficial de los líquidos en contra de los metales puede también diferir de su tensión superficial en contra del aire, ya que la velocidad de vaporización del agua es mayor que la de los líquidos orgánicos bajo las mismas condiciones. Si la tensión superficial de un líquido es baja, tiende a mojar las superficies de manera que la burbuja es fácil ocluida por el líquido y asciende.

2.1.2) Características del líquido.

La resolución práctica de un problema de evaporación está profundamente afectada por el carácter del líquido que se concentra. La gran variedad de características del líquido (que exige criterio y experiencia en el diseño y operación de evaporadores) es lo que hace que esta operación constituya un arte distinto de la simple transmisión de calor.

Concentración. Aunque el líquido que entra como alimentación a un evaporador puede estar suficientemente diluido y poseer muchas de las propiedades físicas del agua, a medida que se va evaporando el líquido, aumenta la concentración, y la solución adquiere carácter más particular. La densidad y viscosidad aumentan, lo que desmejoran notablemente la transferencia de calor. Y en algunos casos se llega a puntos tales de concentración, en que los solutos cristalizan y es necesario retirar dichos cristales para evitar incrustaciones. Así mismo la temperatura de ebullición de la solución tiende ser mayor a la del agua a la misma presión de trabajo, cuando la solución se hace más concentrada, siendo dicho aumento conocido como Elevación de Punto de Ebullición

Formación de espuma. Esta situación se presenta básicamente en soluciones que contienen sustancias orgánicas (ácidos grasos, etc.) y que se traduce en un gran problema de arrastre de líquido ya que la espuma sale del evaporador junto con el vapor que se produce durante la operación.

Sensibilidad térmica. Esta situación se presenta básicamente en la industria de alimentos y farmacéutica, ya que algunas sustancias, se degradan a altas temperaturas o calentamiento prolongado.

Formación de incrustaciones. Algunas soluciones forman incrustaciones en el interior de los tubos, lo que disminuye paulatinamente los coeficientes de transferencia de calor en el equipo, hasta que debe pararse la operación.

Materiales de construcción. Siempre que es posible, los evaporadores se construyen en hierro colado o acero. Sin embargo, muchas soluciones atacan a los metales ferrosos o son contaminadas por ellos, siendo entonces preciso utilizar materiales especiales tales como cobre, níquel, acero inoxidable, aluminio, grafito y plomo, estos materiales son caros, y resulta muy conveniente obtener elevadas temperaturas de transmisión de calor con el fin de disminuir el costo inicial del aparato.

En el diseño de un evaporador se tienen que considerar muchas otras características del líquido, tales como calor específico, calor de concentración, temperatura, liberación de gases durante la ebullición, toxicidad, peligro de explosión radiactividad, etc. Debido a la gran variedad de las propiedades de los líquidos, existen diferentes diseños de evaporadores. La elección de un evaporador se hará tomando en cuenta las características del líquido.

2.1.3) Clasificación del equipo de vaporización

Hay dos principales tipos de equipo tubular vaporizador: calderas e intercambiadores vaporizadores. Las calderas son tubulares calentados directamente que convierten la energía del combustible en calor latente de vaporización. Los intercambiadores vaporizadores no tienen fuego directo y convierten el calor latente o sensible de un fluido en calor latente de vaporización de otro; si se usa para evaporar agua o una solución acuosa se le llama evaporador.

Si se usa para suministrar los requerimientos de calor en el fondo de una columna de destilación aunque el vapor sea de agua ó no, es llamado un hervidor. Cuando no se forma vapor de agua ni se usa para destilación es llamado vaporizador. Cuando en conexión con un sistema de generar potencia se une un evaporador para producir agua pura, o para cualquier proceso asociado con la generación de potencia, se llama evaporadores para plantas

de fuerza. Al usar un evaporador para concentración de una solución se le llama evaporador químico.

Los hervidores suministran parte del calor requerido para la destilación y no un cambio en la concentración aunque lo último no se puede evitar.

2.1.4) Evaporadores para plantas de fuerza

Uno de sus propósitos es proveer de agua relativamente pura para la alimentación de la caldera. Sus características son: un elemento calefactor tubular y un medio para remover la incrustación de la parte exterior de los tubos. Estos operan con agua hasta la mitad, la mitad superior es el espacio en el cual las gotas de agua se separan del vapor y, asimismo, todos están equipados con separadores que regresan el líquido separado debajo de nivel de trabajo del evaporador.

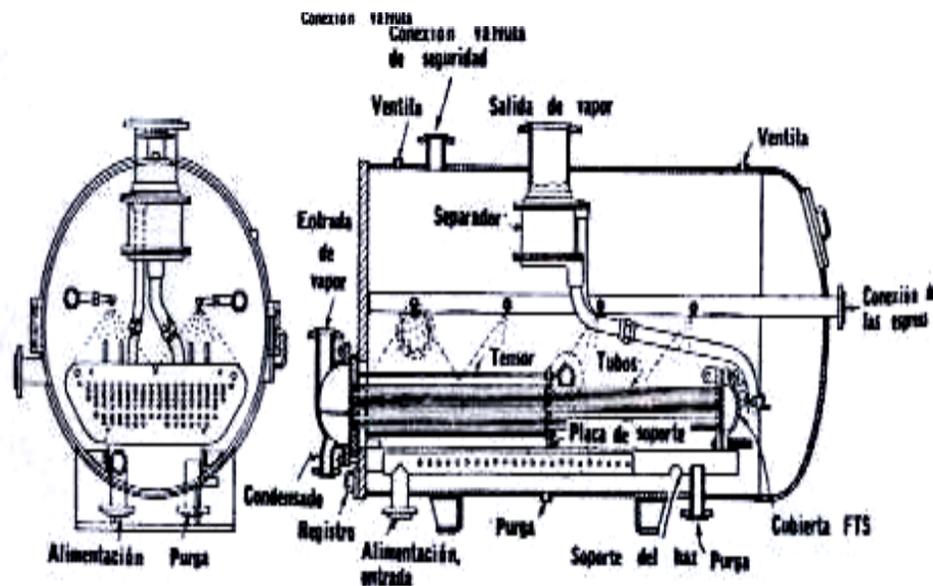


Fig. 2.1.4.a Evaporador para planta de fuerza

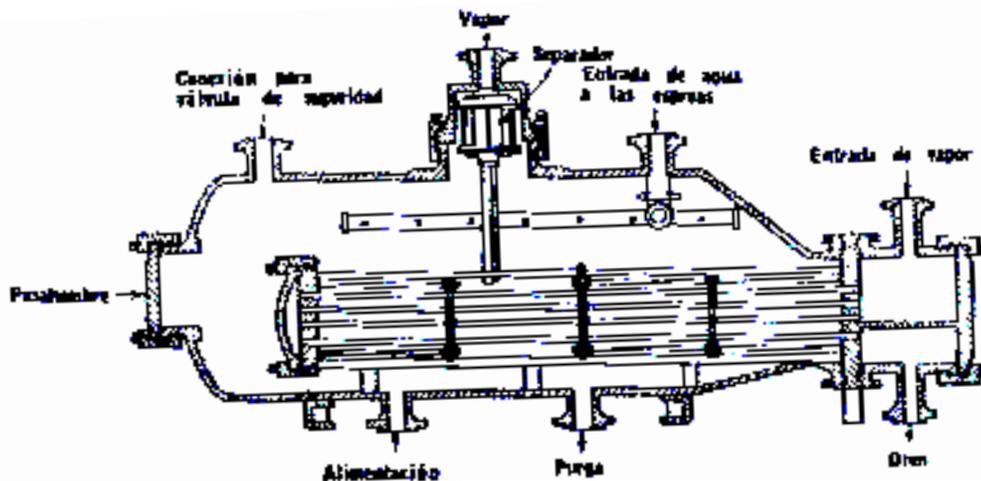


Fig. 2.1.4.b Evaporador para planta de fuerza

En este tipo de evaporadores la formación de incrustaciones es tal que se considera normal la limpieza del evaporador para planta de fuerza cada 24 hrs.

Existen tres tipos principales de incrustaciones:

1. Incrustación suave que puede ser lavada del tubo
2. Incrustación dura que puede ser removida únicamente de forma manual
3. Incrustación dura que puede ser desprendida del tubo.

2.1.5) Funcionamiento de evaporadores tubulares

Las principales características de funcionamiento de un evaporador tubular calentado con vapor de agua son: la capacidad y la economía. La *capacidad* se define como el número de kilogramos de agua vaporizados por hora. La *economía* es el número de kilogramos vaporizados por kilogramo de vapor vivo que entra como alimentación a la unidad.

2.1.6) Economía de un evaporador

El principal factor que afecta a la economía de un sistema de evaporación de múltiples efectos es la entalpía. Mediante un diseño adecuado, la entalpía del vapor vivo del primer efecto se puede utilizar una o más veces, dependiendo del número de efectos de que conste el evaporador. La economía también depende de la temperatura de la alimentación. Si dicha temperatura es inferior a la del primer efecto, una parte de la entalpía de vaporización del vapor es para calentar la alimentación y solamente queda la fracción restante para la evaporación. Si la alimentación está a una temperatura superior a la ebullición la vaporización súbita que se produce proporciona una evaporación.

2.1.7) Balance de entalpía para un evaporador de simple efecto.

En un evaporador de simple efecto, el calor latente de condensación del vapor de agua se transmite a través de la superficie de calentamiento para vaporizar agua de una solución problema. Se necesitan dos balances de entalpía, uno para el lado del vapor y otro para el lado del líquido que hierve.

2.1.8) Evaporación de múltiple efecto.

En la Fig. 2.1.8.b se representan dos evaporadores de tubos cortos, de circulación natural, conectados para formar un sistema de doble efecto. Las conexiones se realizan de forma que el vapor procedente de un efecto sirve como medio de calentamiento para el efecto contiguo.

Mediante un condensador y un eyector se establece un vacío en el segundo efecto se retiran los no condensables del sistema. El primer efecto de un

evaporador de efecto múltiple es aquel en el que se introduce el vapor vivo y el espacio de vapor adquiere el valor más elevado, el segundo efecto es el que tiene la menor presión en el espacio de vapor. La presión en el segundo efecto es menor que el primer efecto del cual recibe el vapor. Por consiguiente, todo lo que se ha dicho para un evaporador de simple efecto es aplicable a cada una de las unidades de uno de múltiple efecto. El acoplamiento de una serie de unidades para formar un sistema de efecto múltiple es una cuestión que afecta al arreglo de tuberías y no a la estructura de las unidades individuales.

En la Fig. 2.1.8.b la alimentación diluida entra en el primer efecto, donde pasa al segundo efecto para alcanzar concentración final. La solución concentrada se extrae del segundo efecto mediante una bomba.

En la operación en estado estacionario, las velocidades de flujo y las velocidades de evaporación son tales que en ninguno de los efectos hay acumulación de soluto o disolvente. Una vez que se fijan la temperatura, con velocidad de flujo de la alimentación, se establecen las presiones de entrada y en el condensador, y se mantienen los niveles de los distintos efectos, todas las concentraciones, velocidades de flujo, temperaturas en los efectos se establecen automáticamente y permanecen constantes por si solas durante la operación.

La concentración del segundo efecto solamente se puede modificar variando la velocidad de 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 de la solución concentrada, alcanza un nuevo estado estacionario para el valor deseado.

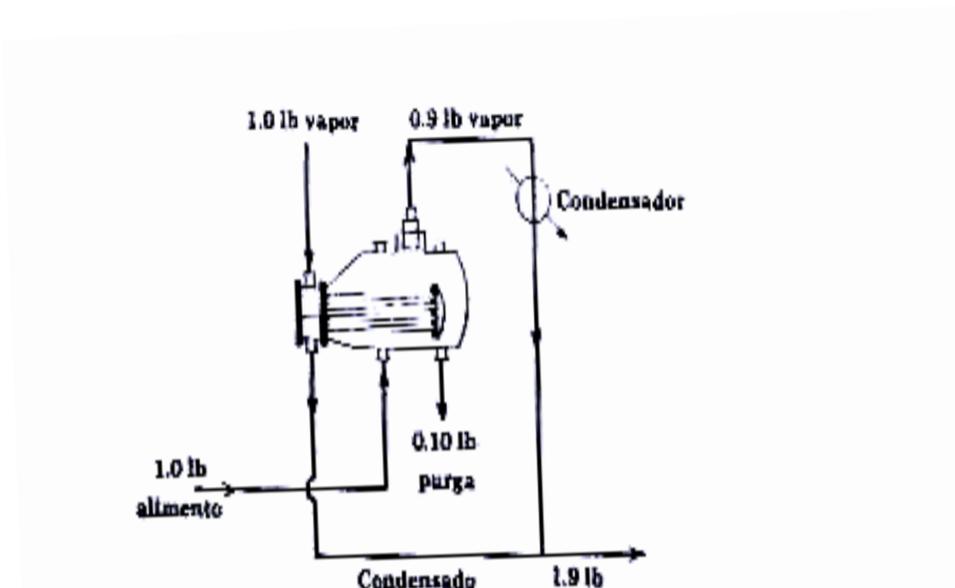
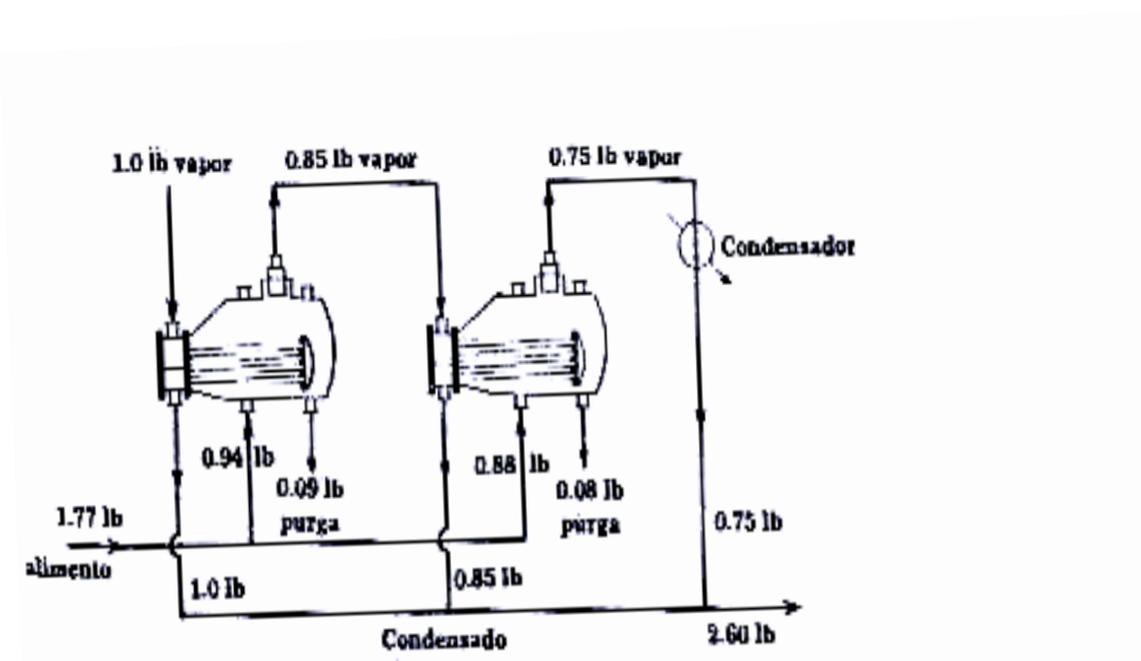


Fig. 2.1.8.a Evaporador de un efecto



(b) DOBLE EFECTO - 1 LB DE VAPOR PRODUCE 1 + 1.60 LB AGUA DESTILADA

Fig. 2.1.8.b Evaporador de doble efecto

2.1.9) Operación de un proceso al vacío.

Los evaporadores operan por lo regular con el último efecto al vacío y una de las consideraciones importantes es establecer el método para mantener continuamente el vacío. El uso de un compresor mecánico para el último paso, usualmente es prohibitivo debido a los requerimientos de energía para la compresión. No hay razón para operar un compresor mecánico cuando la reducción en volumen puede lograrse parcialmente por condensación; lo último es un principio involucrado en el condensador barométrico con eyectores para aire.

2.2) EVAPORACIÓN QUÍMICA

Comparación entre evaporación en las plantas de fuerza y la evaporación química. El propósito en los evaporadores de fuerza, es la separación de agua pura a partir de agua cruda o tratada. Retirando las impurezas mediante purgas. En la industria química la manufactura de las sustancias químicas como sosa, sal, azúcar, empieza con soluciones acuosas diluidas de las que se debe de eliminar el agua para poder llegar a la cristalización en un equipo adecuado para este fin. En los evaporadores de planta de fuerza, la porción

no evaporada del alimento es residuo, mientras que en los evaporadores químicos es el producto. Las diferencias entre estos dos son las siguientes.

Ausencia de purgas. Los evaporadores químicos no operan con el sistema de purgas y en lugar de que el líquido se alimente en paralelo a cada evaporador por lo regular se alimenta por sistemas de múltiple efecto en serie.

El alimento en el primer efecto es parcialmente evaporado en él y parcialmente en el resto de los efectos, cuando el alimento fluye en la misma dirección que el vapor se le llama *alimentación en paralelo* y cuando el alimento lo hace en dirección contraria se llama *alimentación en contracorriente*. Preferentemente se usa la alimentación en paralelo; pero si los líquidos son muy viscosos la ventaja es para la alimentación a contracorriente y que la temperatura del primer efecto es siempre la mayor y la correspondiente viscosidad será menor. La ausencia de purga permite una mayor recuperación de calor en el evaporador químico.

Elevación en el punto de ebullición (EPE). Los evaporadores químicos son incapaces en ciertas condiciones, de una alta utilización de los potenciales térmicos y consecuentemente requiere grandes superficies. Debido a que las soluciones acuosas experimentan un aumento en el punto de ebullición sobre la temperatura de saturación correspondiente al agua pura a la misma presión.

Propiedades del fluido. En el evaporador de la planta de fuerza el proceso de ablandamiento de agua se modifica en diferentes localidades, de manera que la composición del alimento del evaporador cause un mínimo de espuma y otras

dificultades en la operación. En el evaporador químico el residuo, una solución concentrada, es el producto deseado, y usualmente no se puede usar ajustes a la solución para prevenir la espuma o eliminar el depósito incrustante. Además las soluciones concentradas producen licores de alta viscosidad. Y ya que la ebullición es una combinación de vaporización y convección libre, el coeficiente total de transferencia de calor es una función tanto de la concentración como de la temperatura a la cual la evaporación tiene lugar.

2.2.1) Evaporadores Químicos

Los evaporadores químicos se clasifican en dos grupos: de circulación natural y de circulación forzada. Los de circulación natural se usan unitariamente o en efecto múltiple para los requerimientos más simples de evaporación. Los evaporadores de circulación forzada se usan para líquidos viscosos, para los que forman sales, y las soluciones que tienden a incrustarse.

Los evaporadores de circulación natural se clasifican en cuatro clases principales:

1. Tubos horizontales
2. Calandria con tubos verticales
3. Tubos verticales con canasta
4. Tubos verticales largos

Evaporadores de tubos Horizontales. Son los tipos más antiguos de evaporadores químicos. Consisten en un cuerpo cilíndrico o rectangular y de un

haz de tubos que usualmente es de sección cuadrada. Este tipo de evaporadores no aprovechan bien las corrientes térmicas inducidas por el calentamiento, y por lo mismo no son tan aceptables como los tipos que los han reemplazado. Es el único tipo evaporador que emplea vapor dentro de los tubos. La ventaja de estos evaporadores horizontales es el reducido espacio requerido para su instalación en la dimensión vertical y el arreglo del haz de tubos, de manera que el aire puede purgarse con el vapor no permitiendo que bloquee la superficie de calentamiento. Este evaporador es menos satisfactorio para los líquidos que formen incrustaciones o que depositen sales; los depósitos se forman en el exterior de los tubos, y son, por lo tanto, usados únicamente para problemas de concentración relativamente simples, en lugar de la preparación de un líquido para una cristalización posterior. Están indicados para procesos en los que el producto final es un líquido en lugar de un sólido, tal como jarabes de azúcar industriales, donde el gran volumen de líquido almacenado en el evaporador puede permitir un ajuste preciso de la densidad final cambiando la cantidad retenida en el evaporador. La longitud de los tubos esta determinada por el tamaño del evaporador. En la Fig. 2.2.1.a se muestra un evaporador de tubos horizontales.

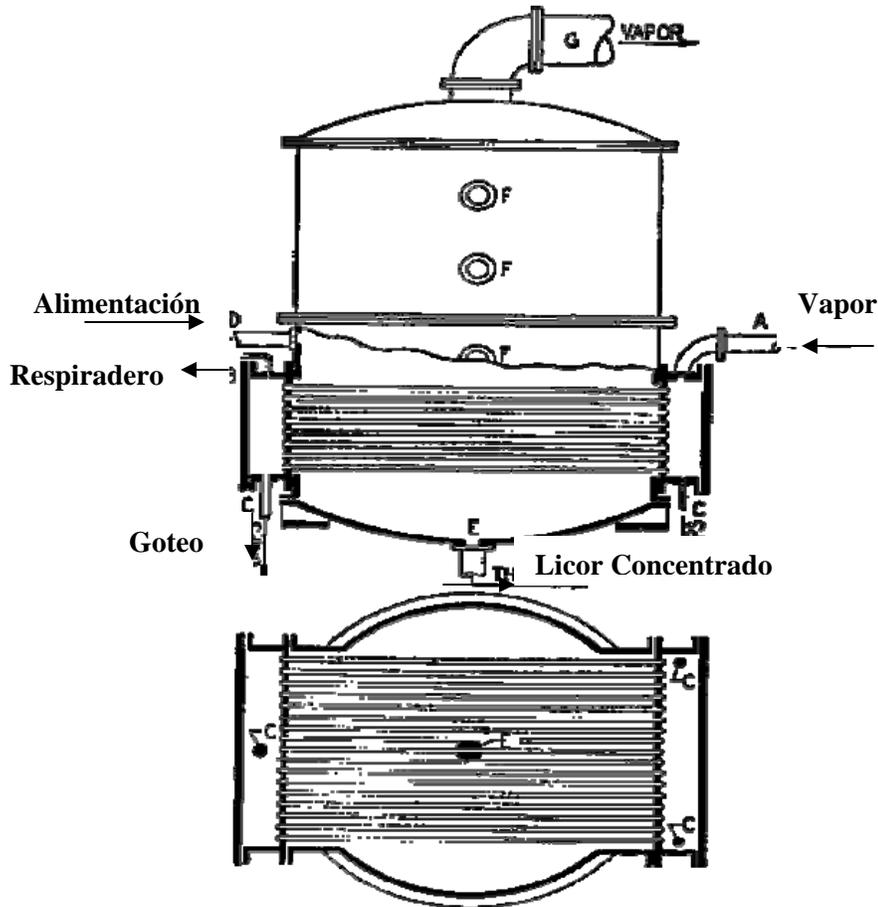


Fig 2.2.1.a Evaporador de tubos horizontales:

A: entrada de vapor; B: purga de gases incondensables; C: salida de condensados; D, entrada de líquido a evaporar; E: salida de producto concentrado; F, ventanillas; G: Salida de vapor.

Evaporadores de Calandria. Consiste en un haz de tubos vertical, corto, usualmente de no más de 60 pulgadas de altura, colocado entre dos espejos que se remachan en las bridas del cuerpo del evaporador. El vapor fluye por fuera de los tubos de la calandria, y hay un gran paso circular de derrame en el centro del haz de tubos donde el líquido más frío recircula hacia la parte inferior de los tubos. El área de este derrame varía desde la mitad del área de los tubos hasta una área igual a ella. Los tubos son

grandes hasta de 3 plg. DE (Diámetro Externo), para reducir la caída de presión y permitir una rápida circulación, y se instalan en espejos encasquillados. La distribución de una calandria típica se muestra en la Figura 2.2.1.b

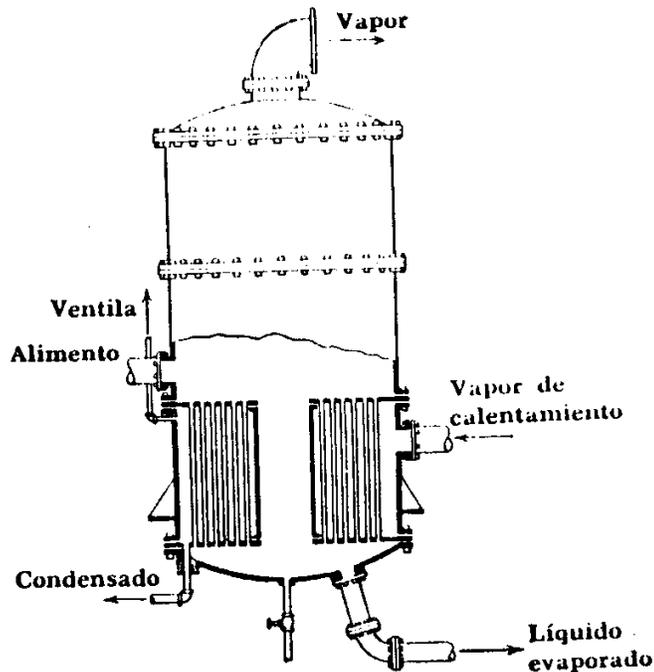


Fig 2.2.1.b Evaporador de calandria

Uno de los problemas es colocar deflectores en el espacio de vapor, de manera que haya una distribución relativamente completa del vapor en los tubos. Otro problema es proveer de puntos de purga adecuados para que no formen bolsas de gases no condensables. El condensado se remueve en cualquier punto conveniente. El espacio sobre el nivel del líquido en la calandria, sirve primariamente para liberar el líquido que es arrastrado por

el vapor. Un accesorio común a todos los evaporadores es una trampa que esta instalada en la línea de vapor con el propósito de remover el líquido arrastrado y de devolverlo al cuerpo del líquido. En la Fig. 2.2.1.c se muestran las trampas típicas. Su principio de operación es la eliminación centrifuga de las gotitas de líquido.

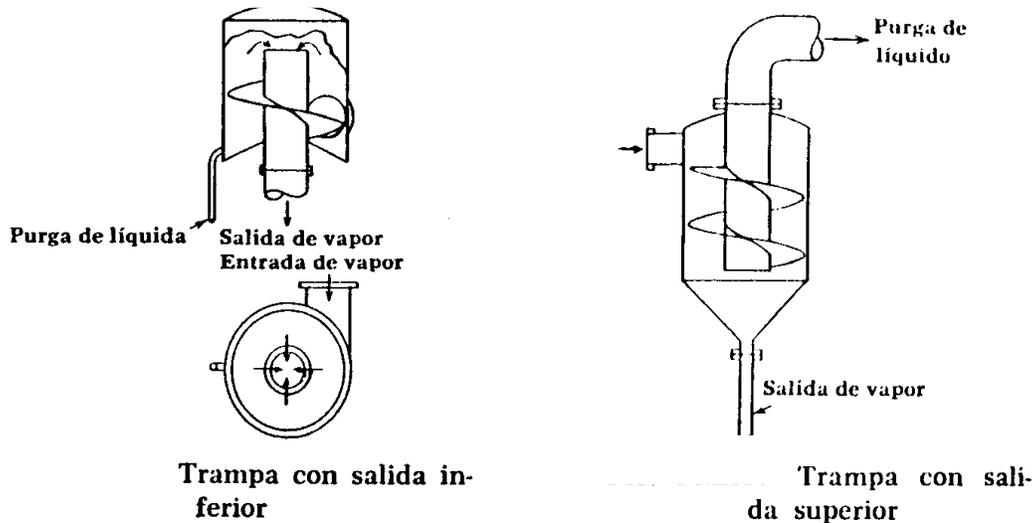


Fig. 2.2.1.c Trampas típicas de vapor

El evaporador de calandria también se conoce como evaporador estándar. Debido a que la incrustación ocurre dentro de los tubos, es posible usar dicho evaporador para servicios más rigurosos que el de tubos horizontales, y además, se puede instalar un agitador en el fondo cónico o abombado para aumentar la circulación.

Evaporadores de Canasta. (Fig. 2.2.1.d) Es similar al evaporador de calandria, excepto que tiene el haz de tubos desmontables, lo que permite una limpieza rápida. El haz de tubos se soporta sobre unas ménsulas interiores, y el derramadero está situado entre el haz de tubos y el cuerpo del evaporador, en lugar de en la parte central. Generalmente se diseña con fondo cónico y se le puede instalar un agitador para aumentar la

circulación; por lo que puede usarse para licores con tendencia a incrustar, aun cuando se recomienda para líquidos con altas viscosidades o muy incrustantes.

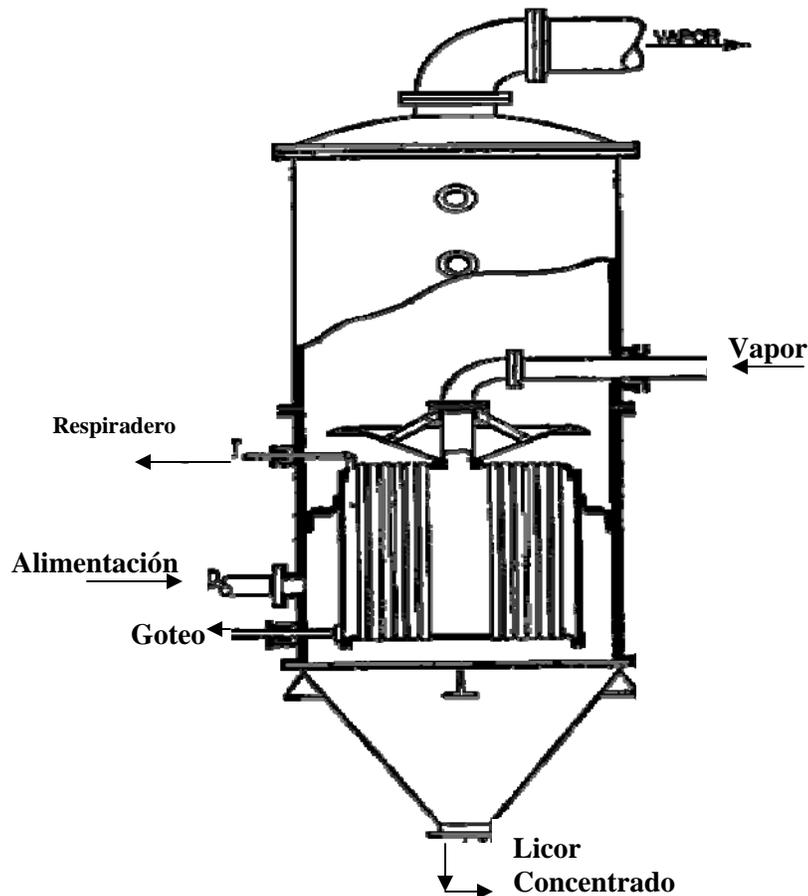


Fig. 2.2.1.d Evaporador de canasta

Evaporadores de tubos verticales largos. (Fig. 2.2.1.e) Esta formado por un elemento calefactor tubular diseñado para el paso de los licores a través de los tubos sólo una vez, movidos por la recirculación natural. El vapor entra a través del cinturón y el haz de tubos tiene deflectores de manera

de lograr un movimiento libre del vapor, condensados y no condensados hacia abajo. El espejo de los tubos está libre y justamente sobre él hay un deflector de vapor para reducir el arrastre. Este tipo de evaporador no es adaptable a licores incrustantes o que depositan sales, pero es excelente para el manejo de líquidos espumosos o de formas natas. La velocidad del vapor que sale de los tubos es mayor que en los tipos de tubos verticales cortos. En este tipo, la liberación de los vapores ocurre fuera del cuerpo del evaporador.

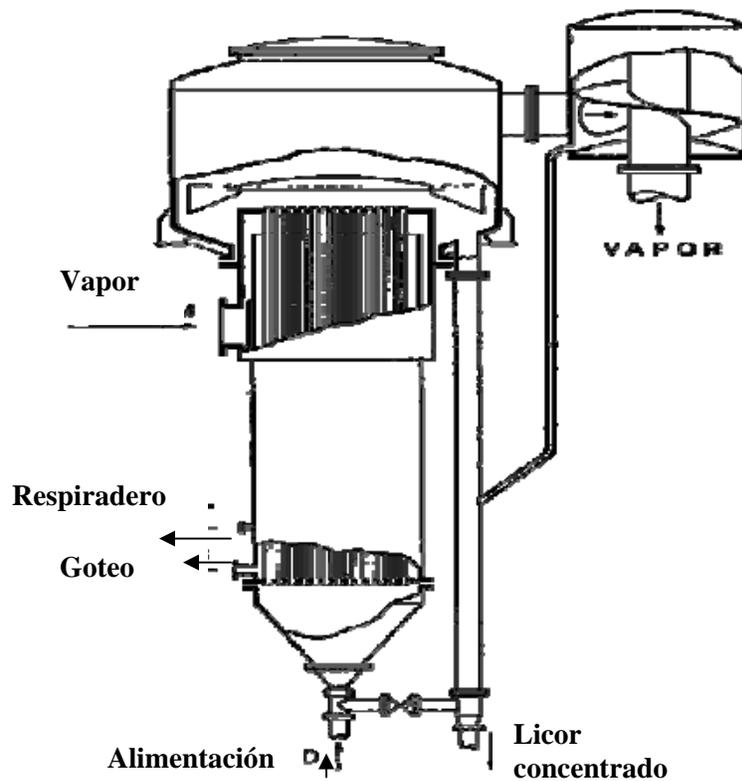


Fig. 2.2.1.e Evaporador de tubos verticales largos

Evaporadores de Circulación Forzada. (Fig. 2.2.1.f) Estos pueden no ser tan económicos como los evaporadores de circulación natural, pero son necesarios cuando los problemas de concentración involucran soluciones de flujo pobre, incrustantes, y ciertas características térmicas. Con materiales muy viscosos no hay otra alternativa sino la de usar este tipo de evaporador. También donde hay tendencia a la formación de incrustaciones o al depósito de sales. Las altas velocidades que se obtienen por el uso de las bombas de recirculación, son los únicos medios de prevenir la formación de depósitos excesivos. Estos evaporadores están bien adaptados para un control preciso del flujo, particularmente cuando un tiempo de contacto excesivo puede ser perjudicial a la solución química. Sus tubos son más pequeños que los tipos de circulación natural.

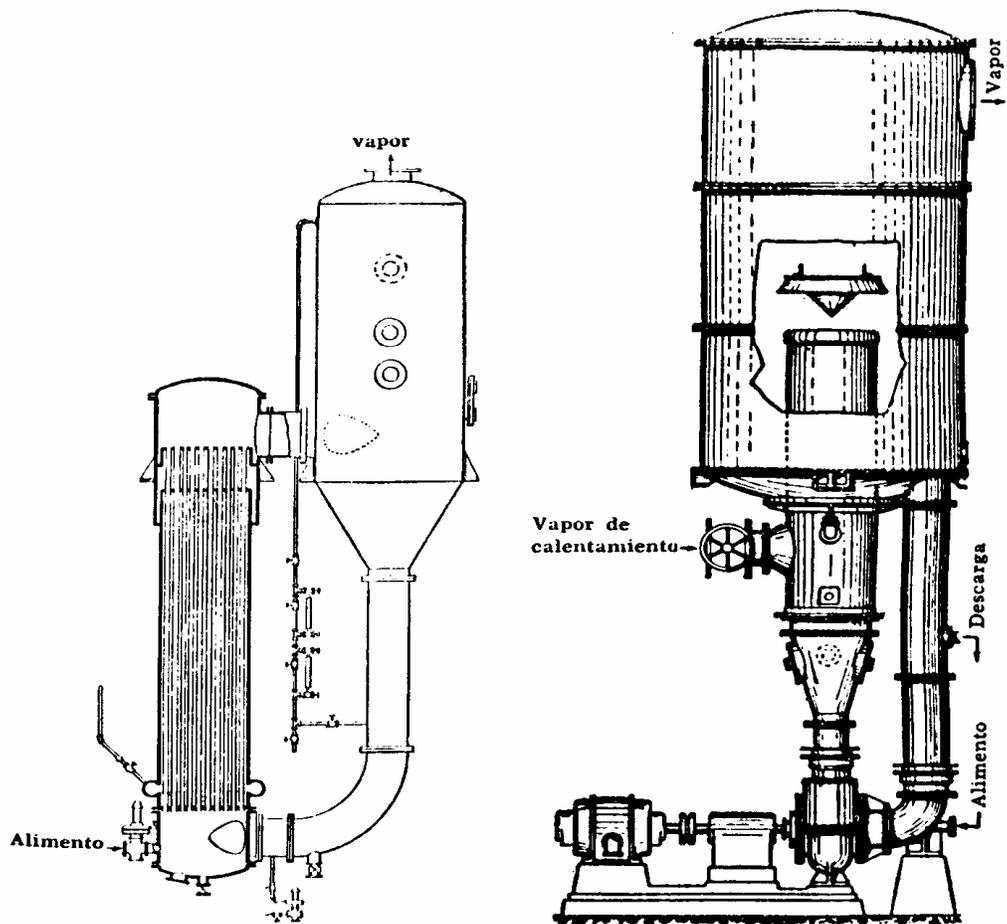


Fig 2.2.1.f Evaporadores de circulación forzada

CAPITULO III

SISTEMAS DE EVAPORACION PROPUESTOS

3.1) Introducción

Este capítulo tiene como objetivo hacer la comparación de los dos sistemas propuestos para dar solución al problema planteado de evaporación de agua con diferentes sales. Se dispone de un evaporador de tubos horizontales para llevar a cabo el estudio, y un invernadero tipo Minigreen, con la finalidad de encontrar el mejor sistema que nos lleva a resultados esperados. Para ello se hará una descripción breve del funcionamiento de cada uno de ellos.

3.1.1) Criterios para la selección y diseño de un evaporador

En el diseño individual de cada equipo de evaporación se deben de tomar en cuenta diversos factores, que en la mayoría de los casos están interrelacionados, que determinan la selección de un evaporador por lo que se debe analizar exhaustivamente para asegurar que los requerimientos de procesos, costos de operación, así como el tiempo mínimo fuera de servicio sean cumplidos.

Entre los factores que deberán analizarse cuidadosamente están las características de la solución tales como concentración, temperatura de ebullición, solubilidad, viscosidad, incrustación o ensuciamiento, nucleación, cristalización, sensibilidad térmica, diferencia de temperatura, elevación en el punto de ebullición, espumación, medio de calentamiento, condiciones de operación, producto o productos deseables, etc., así como los factores relativos al diseño mecánico.

El ensuciamiento es un asunto cotidiano en todos los equipos de transferencia de calor. La formación de capas de incrustación o de ensuciamiento está gobernada por complejas relaciones fisicoquímicas que son afectadas por las condiciones de operación. En casi todos los

evaporadores el ensuciamiento es debido a la cristalización, sedimentación, reacción química, polimerización, corrosión o por acumulación de materia orgánica.

Otro factor que influye sobre el ensuciamiento es la velocidad del fluido, ya que la tendencia a incrustar es considerablemente reducida si la velocidad aumenta.

La incrustación puede tener los siguientes tipos (independientemente del tipo de aplicación de transferencia de calor particular).

- a. Incrustación por cristalización
- b. Incrustación de partículas
- c. Incrustación por reacción química
- d. Incrustación por corrosión
- e. Incrustación biológica

En general, la limpieza de los evaporadores puede llevarse a cabo por dos caminos:

1.- LIMPIEZA MECANICA

2.- LIMPIEZA QUÍMICA

1. LIMPIEZA MECANICA

La limpieza mecánica se realiza mediante barrenadoras o raspadores eléctricos. Sin embargo presenta la desventaja de que desgastan los tubos e incluso la herramienta desprende pequeñas trazas de metal, además de que la mano de obra es costosa.

2. LIMPIEZA QUÍMICA

La limpieza química consiste en disolver las incrustaciones en algún disolvente adecuado, que pudiera ser agua, ácido o un álcali dependiendo

del tipo de sustancia depositada. Así cuando las incrustaciones son solubles en agua, se puede resolver el problema haciendo hervir agua pura en el evaporador. En el caso de oxalatos y silicatos se emplean soluciones de sosa, y en el caso de carbonatos, sulfitos y fosfatos se emplean soluciones de ácido clorhídrico.

La limpieza de los evaporadores para eliminar los depósitos incrustantes obliga parar la producción periódicamente con las consecuentes pérdidas económicas. Por este motivo se debe de tratar de disminuir hasta donde sea posible la formación de incrustaciones. De hecho no existe ningún método para evitar completamente que se depositen sales cuando se evaporan soluciones que las contengan, pero la experiencia ha demostrado que la velocidad de formación de las incrustaciones disminuye sensiblemente al aumentar la velocidad del líquido. Esto significa una ventaja más en el empleo de circulación forzada en los evaporadores.

La incrustación formada provoca una caída en el coeficiente de transferencia de calor y por lo tanto en la transmisión de calor por lo que deben eliminarse, pero la frecuencia con la que se da limpieza al equipo no debe ser arbitraria sino que existe un tiempo óptimo de operación entre cada dos periodos de eliminación de depósito. Cada vez que se da limpieza a el equipo la producción se detiene y si se hace con frecuencia la producción media de la planta es baja.

Por otra parte, si las limpiezas son muy espaciadas el coeficiente de transferencia de calor medio es bajo y por consiguiente la capacidad del equipo también. El tiempo óptimo entre cada limpieza varia con las condiciones de operación, y en general, se determinan por experiencia y por estudio previo.

3.1.2) Descripción del evaporador de tubos horizontales

El evaporador que se determinó para la experimentación del presente trabajo es un evaporador de tubos horizontales que son los tipos más antiguos de evaporadores químicos. Consisten en un cuerpo rectangular y de un haz de tubos. Es el único tipo evaporador que emplea vapor dentro de los tubos. La ventaja de estos evaporadores horizontales es el reducido espacio requerido para su instalación en la dimensión vertical y el arreglo del haz de tubos.

El diseño mecánico limita el uso de este equipo a soluciones no viscosas y concentraciones tales que no formen incrustaciones o depositen sales que se acumulen en la parte superior de los tubos. Ya que los tubos se encuentran sumergidos y se tiene un gran volumen del líquido almacenado dentro del evaporador es susceptible a un control fácil y preciso. Debido al gran volumen del líquido presente, se logra una densidad uniforme en el líquido de descarga, que puede ajustarse y controlarse modificando la velocidad de alimentación, presión de vapor de calentamiento o presión de vacío. Otra de sus ventajas es que ocupa muy poco espacio y su costo de instalación por unidad de superficie calefactora es menor que la de otros tipos de evaporadores.

Las ventajas de este equipo se resumen en su bajo costo y en los coeficientes de transferencia de calor obtenidos los cuales llegan a ser de moderados a altos. Su principal desventaja radica en que manejan exclusivamente líquidos no incrustantes ni ensuciantes.

Como estos evaporadores son los únicos que manejan el líquido de proceso por fuera de los tubos y el medio de calentamiento por los tubos, se les usa exclusivamente como rehervidores Kettle en las torres de destilación.

3.1.3) Descripción general

El evaporador piloto hace posible la observación directa del proceso, diseñado para la experimentación y consta de:

1. Un cuerpo rectangular de acero inoxidable
2. Un haz de cuatro tubos horizontales dentro de los cuales se manejará el medio de calentamiento que consiste en vapor saturado
3. Mangueras de acero inoxidable para el transporte del líquido problema a evaporar y el medio de calentamiento.
4. Tanques de almacenamiento de líquido problema con una capacidad de 60 litros
5. Bomba para recirculación de ½ HP
6. Rotámetro de 0 a 900 mL/min
7. Condensador de agua evaporada
8. Enfriador de condensados de vapor
9. Válvula reguladora para entrada de vapor
10. Manómetro para el control de vapor alimentado
11. Termopar en la entrada del evaporador
12. Recirculación a tanque de alimentación del líquido problema
13. Kitazato recolector de agua evaporada por medio de un sistema de vacío

3.1.4) Descripción del proceso

- Se llena el tanque de almacenamiento con el líquido problema hasta alcanzar el nivel indicado de aproximadamente 60 litros. Por medio de la bomba se manda a un tanque elevado para que posteriormente

se alimente por gravedad al evaporador, controlando el flujo mediante la ayuda de un rotámetro (previamente calibrado).

- Se verifica la existencia de vapor, y se purga la línea correspondiente, antes de alimentar al evaporador. Una vez purgada la línea de vapor y ya habiendo alimentación del líquido problema se regula el flujo de vapor (válvula reguladora).
- Establecidos el flujo de vapor y el del líquido problema, se abren las válvulas de alimentación de agua de enfriamiento al condensador y enfriador.
- Se abre la válvula de vacío para disminuir la temperatura de ebullición, aumentando el gradiente de temperatura entre el vapor y el líquido problema, maximizando la velocidad de evaporación.
- Comenzada la evaporación se espera que el sistema alcance el régimen permanente.
- Se toman los datos de las variables consignadas en las tablas (3.1.6)

3.1.5) Evaporador de tubos horizontales piloto

Para obtener datos experimentales sobre un evaporador de tubos horizontales se diseñó y construyó un equipo piloto con las siguientes características:

Material utilizado en su construcción:

- 4 Tubos horizontales de 1" de D y 0.405 m de L (acero inoxidable)
- 1 Tubo irrigador de ½ " de D y 0.405 m de L (acero inoxidable)
- 1 Tubo de 2 " de D y 0.28 m de L (acero inoxidable)
- 3 Niples de 1" * 6" (acero inoxidable)
- 2 Niples de ½ " * 6" (acero inoxidable)
- 2 Placas (Tapas) de 0.405 * 0.28 m y espesor 3/16" (acero inoxidable)

- 2 Placas de 0.405 * 0.05 m y espesor 3/16" (acero inoxidable)

- 2 Placas (Espejos) 0.28 * 0.05 m y espesor 3/16" (acero inoxidable)
- 1 Mirilla
- Solera y tornillos
- 2 kg Soldadura A.I. 3/32

Material utilizado en la instalación:

Entrada de vapor

- Tuercas unión ½ "
- Válvula de globo o aguja ½ "
- Manómetro
- T de ½ "
- Manguera de ½ "

Condensados de vapor

- Cople de ½"
- Conexión de ½"
- Tubería de ½ "
- Enfriador
- Codo ½"

Salida de vapores (Producción)

- 2 codos de 1"
- Tubería acero inoxidable de 1"
- Abrazadera de 1"
- Condensador
- 1 Kitazato
- cinta parafilm
- mangueras para el vacío

Alimentación al evaporador

- 2 Tanques de almacenamiento (acero inoxidable)
- Rotámetro de 0 a 900 mL/min
- Termopar
- Tubería acero inoxidable de 1"
- Bomba de ½ HP
- Válvulas de aguja
- Manguera de ½ "



Fig. 3.1.5.a Imagen Frontal del Evaporador de Tubos Horizontales

3.1.6) Datos experimentales obtenidos en el evaporador de tubos horizontales piloto.

T1= Temperatura del agua del tanque elevado

T2= Temperatura del agua de recirculación

T3= Temperatura del agua de entrada al evaporador

T4= Temperatura agua de enfriamiento entrada

T5= Temperatura agua de enfriamiento salida

T6= Temperatura de los evaporados

T7= Temperatura de los condensados

(5-Oct-06)

Evaporados (mL/min)	Condensados (mL/min)	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	P° de vapor (kg/cm2)	Flujo de Alimentación (mL/min)	T4 (°C)	T5 (°C)	T6 (°C)	T7 (°C)
27	50	80	85	59	0.4	180	19	22	23	37
46.58	77.64	72	72	61	0.4	346	19	21	23	41
35.4	62	70	73	60	0.4	346	19	21	19	39
40	70	68	77	60	0.4	501	19	20	19	39
50	88	65	78	59	0.4	501	19	20	20	41
139.64	211	62	90	58	0.4	648	19	20	20	50
56	152	62	80	55	0.4	648	19	20	19	53

(11-Oct-06)

Evaporados (mL/min)	Condensados (mL/min)	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	P° de vapor (kg/cm2)	Flujo de Alimentación (mL/min)	T4 (°C)	T5 (°C)	T6 (°C)	T7 (°C)
165	190	68	81	60	0.4	800	22	25	25	56
172	200	67	80	60	0.4	800	22	28	25	58
115	180	65	80	55	0.4	957	22	28	25	56
90	170	65	81	57	0.4	957	22	28	22	56

(12-Oct-06)

Evaporados (mL/min)	Condensados (mL/min)	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	P° de vapor (kg/cm2)	Flujo de Alimentación (mL/min)	T4 (°C)	T5 (°C)	T6 (°C)	T7 (°C)
72.24	150	68	92	64	0.4	957	22	29	25	54
58.1	153	60	92	56	0.4	957	22	29	25	57
71.22	150	61	82	57	0.4	957	22	26	25	54
68.75	163	59	92	55	0.4	1095	22	30	25	58
55.73	160	58	92	55	0.4	1095	22	30	25	58
55.38	168	56	92	53	0.4	1095	22	30	25	58
69.23	180	64	92	59	0.4	1246	22	29	25	59
65.45	170	63	92	58	0.4	1246	22	29	25	58
44.03	180	61	92	57	0.4	1246	22	29	25	56

(18-Oct-06)

Evaporados (mL/min)	Condensados (mL/min)	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	P° de vapor (kg/cm2)	Flujo de Alimentación (mL/min)	T4 (°C)	T5 (°C)	T6 (°C)	T7 (°C)
84.74	165	72	93	65	0.4	800	22	24	21	54
77.92	125	66	84	60	0.4	800	22	24	21	50
101.69	175	62	85	58	0.4	800	22	23	21	54
46.95	117.5	60	83	55	0.4	648	22	23	20	49
58.82	115	58	80	53	0.4	648	22	23	21	48
70.67	130	56	80	50	0.4	648	22	23	21	50
35.08	122.5	54	82	50	0.4	957	22	23	20	49
34.24	122.5	52	84	50	0.4	957	22	23	20	49
35.46	115	52	84	50	0.4	957	22	23	20	48
18.5	50	52	66	47	0.4	180	22	23	20	35
17.5	55	52	67	45	0.4	180	22	23	20	33

Tabla de valores promedio

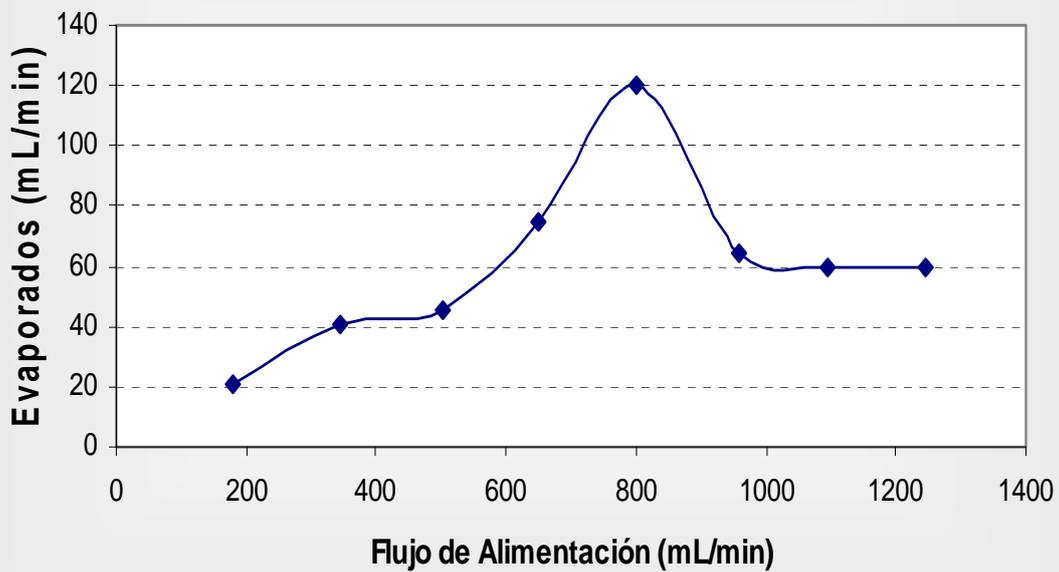
Evaporados (mL/min)	Condensados (mL/min)	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	P° de vapor (kg/cm2)	Flujo de Alimentación (mL/min)	T4 (°C)	T5 (°C)	T6 (°C)	T7 (°C)
21	51.67	61.33	72.67	50	0.4	180	21	22.67	21	35
40.99	69.82	71	72.5	60.5	0.4	346	19	21	21	40
45	79	66.5	77.5	59.5	0.4	501	19	20	19.5	40
74.416	145.1	59.6	82.6	54.2	0.4	648	20.8	21.8	20.2	50
120.27*	171*	67*	84.6*	60.6*	0.4*	800*	22*	24.8*	22.6*	54.4*
63.91	145.38	59.63	84.63	54.87	0.4	957	22	26.13	22.75	52.87
59.95	163.66	57.66	92	54.33	0.4	1095	22	30	25	58
59.57	176.66	62.67	92	58	0.4	1246	22	29	25	57.67

* Valores que utilizaremos para nuestros cálculos (máxima eficiencia obtenida)

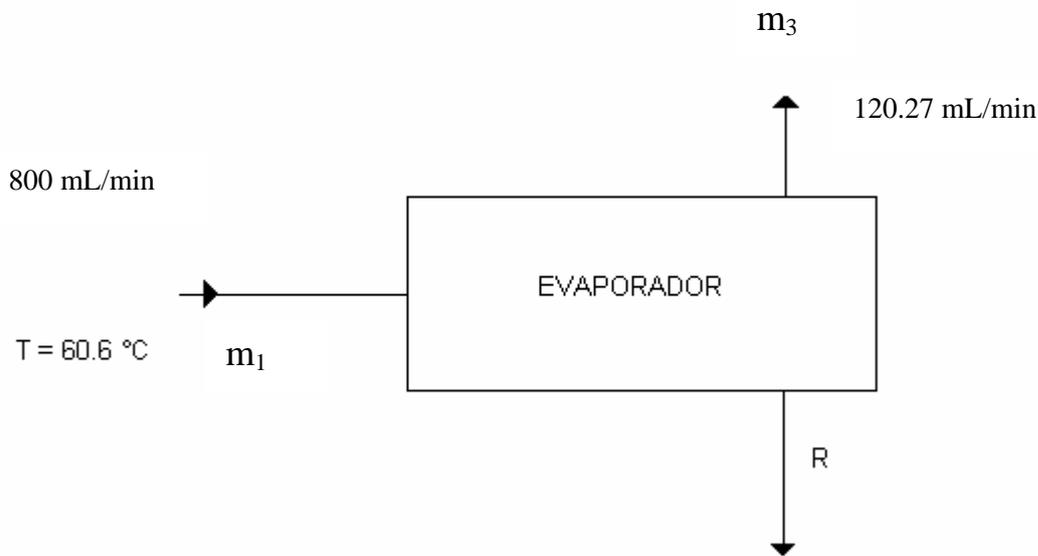
Tabla de flujo alimentado vs promedio de evaporados:

Flujo de Alimentación (mL/min)	Evaporados Promedio (mL/min)
180	21
346	40.99
501	45
648	74.416
800	120.27
957	63.91
1095	59.95
1246	59.57

Gráfica de Evaporados vs Flujo de Alimentación



3.1.7) Esquema representativo del evaporador piloto



Balance de materia en el evaporador piloto:

BALANCE GENERAL: $m_1 = m_3 + R$

Considerando la densidad del agua = 1 g/ml transformamos a flujo másico.

$$800 \frac{\text{mL}}{\text{min}} * 1 \frac{\text{g}}{\text{mL}} = 800 \frac{\text{g}}{\text{min}} \quad \text{y} \quad 120.27 \frac{\text{mL}}{\text{min}} * 1 \frac{\text{g}}{\text{mL}} = 120.27 \frac{\text{g}}{\text{min}}$$

$$\text{Despejando } R = m_1 - m_3 = 800 \frac{\text{g}}{\text{min}} - 120.27 \frac{\text{g}}{\text{min}} = 679.73 \frac{\text{g}}{\text{min}}$$

Balance de energía en el evaporador piloto:

Conociendo que la presión manométrica de vapor es de $0.4 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$ calculamos la presión absoluta.

$$0.4 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} = 0.387 \text{ atm} = \text{presión manométrica}$$

$585 \text{ mmHg} = 0.769 \text{ atm} = \text{presión atmosférica Cd. De México}$

$$P_{\text{abs}} = P_{\text{man}} + P_{\text{atm}} = 0.387 + 0.769 = 1.156 \text{ atm}$$

De tablas de vapor obtenemos que la $T_v = 105 \text{ }^\circ\text{C}$

Calculo de $Q_T = Q_s + Q_\lambda$

Por lo que $Q_s = \dot{m} * C_p * \Delta T$ y conociendo que el $C_{p_{H_2O}} = 4.18 \frac{kJ}{kg^\circ C}$,
 $T_{eb} = 93^\circ C$ y la temperatura del agua de entrada al evaporador = $T_3 = 60.6^\circ C$

Substituimos en ecuación y obtenemos que:

$$Q_s = 800 \frac{g}{min} * 1 \frac{kg}{1000g} * 4.18 \frac{kJ}{kg^\circ C} * (93^\circ C - 60.6^\circ C) = 108.3456 \frac{kJ}{min^\circ C} * \frac{1min}{60s} = 1.8 \frac{kJ}{s}$$

En lo que respecta a calor latente sabemos que $Q_\lambda = m_v * H_v$

Se calcula H_v mediante la siguiente ecuación:

* $H_v = 2502.2 - 2.4834(T) + 0.002301(T)^2 - 0.00001974(T)^3$ substituyendo $105^\circ C$ en la ecuación obtenemos que $H_v = 2243.96 \frac{kJ}{kg}$ y sabiendo que la $m_v = 120.27 \frac{g}{min}$

substituimos en Q_λ por lo que obtenemos:

$$Q_\lambda = 120.27 \frac{g}{min} * \frac{1kg}{1000g} * 2243.96 \frac{kJ}{kg} * \frac{1min}{60s} = 4.498 \frac{kJ}{s}$$

Posteriormente calculamos nuestra Q_T quedando lo siguiente:

$$Q_T = 1.8 + 4.498 = 6.298 \frac{kJ}{s}$$

Calculo del coeficiente de transferencia de calor para el evaporador piloto:

Para el cálculo del coeficiente de transferencia de calor se utilizará la siguiente ecuación:

$$Q = U * A * \Delta T_m$$

*École Nationale Supérieure Des Industries Chimiques, Laboratoire Des Sciences Du Génie Chimique, Thèse "Contacteurs Gaz-Liquide Pour Pompes à Chaleur à Absorption Multi-Étagées" Jesús Torres Merino Annexe III pp.3

Calculo del área:

Datos:

Longitud del tubo = $L = 0.4 \text{ m}$

No. de tubos = 4

$D = 1'' = 0.0254 \text{ m}$

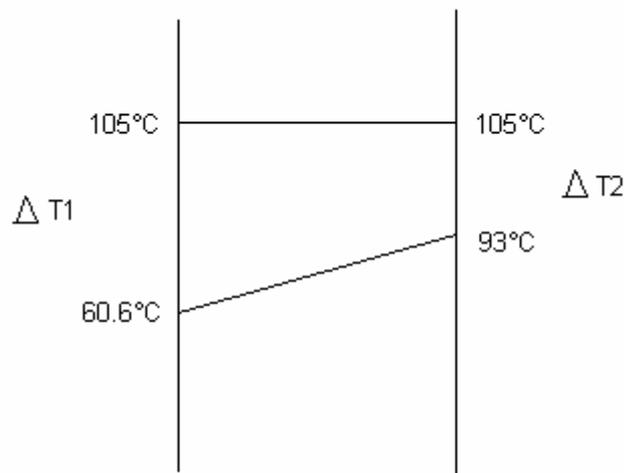
$$A = L * \Pi * D$$

$$A = 0.4 * \Pi * 0.0254 = 0.0319 \text{ m}^2$$

$$A_T = 4 (0.0319) = 0.1276 \text{ m}^2$$

Para la ΔT_m se utiliza la siguiente ecuación:

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}}$$



$$\Delta T_1 = (105 - 60.6) = 44.4 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_2 = (105 - 93) = 12 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Por lo que substituyendo valores en la ΔT_m obtenemos:

$$\Delta T_m = \frac{44.4 - 12}{\ln \frac{44.4}{12}} = 24.76 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Por lo que despejando U de la ecuación original y conociendo la Q calculada anteriormente nos queda:

$U = \frac{Q}{A * \Delta T m}$ y substituyendo obtenemos que:

$$U = \frac{6.298 \frac{kJ}{s}}{0.1276 m^2 * 24.76^\circ C} = 1.99 \frac{kJ}{sm^2 \circ C} = 1.99 \frac{kW}{m^2 \circ C}$$

Cálculos para el evaporador prototipo en base al evaporador piloto:

Calculo del área

Datos:

Longitud del tubo = L = 0.4 m

No. de tubos = 4

D = 1" = 0.0254 m

$$A = L * \Pi * D$$

$$A = 0.4 * \Pi * 0.0254 = 0.0319 m^2$$

$$A_T = 4 (0.0319) = 0.1276 m^2$$

Utilizando la máxima eficiencia de evaporación 120.27 mL/min y suponiendo densidad del agua = 1 g/mL

$$\text{Por lo que } 120.27 \frac{mL}{min} * 1 \frac{g}{mL} * \frac{1kg}{1000g} * \frac{60min}{1h} * \frac{1}{0.1276m^2} = 56.55 \frac{kg}{hm^2}$$

Considerando un día de operación = 21 h

Obtenemos que $56.55 \frac{kg}{hm^2} * \frac{21h}{1dia} = 1187.55 \frac{kg}{m^2 dia}$

Si en un día de operación se requieren evaporar 20 m³ ¿Que área de transferencia de calor en m² se requieren para evaporar dicha cantidad?

Conociendo que 20 m³ = 20,000 Kg. considerando densidad del agua = 1 g/mL

Calculando $1187.55 \frac{kg}{m^2 dia} * \frac{1dia}{20000kg} = \frac{1}{0.0593m^2} = 16.84 m^2$

Por lo tanto en base a esta área de transferencia de calor, se calculará el número de tubos requeridos para el diseño de un evaporador de esta magnitud.

Considerando tubería comercial de D = 1" y L = 6 m

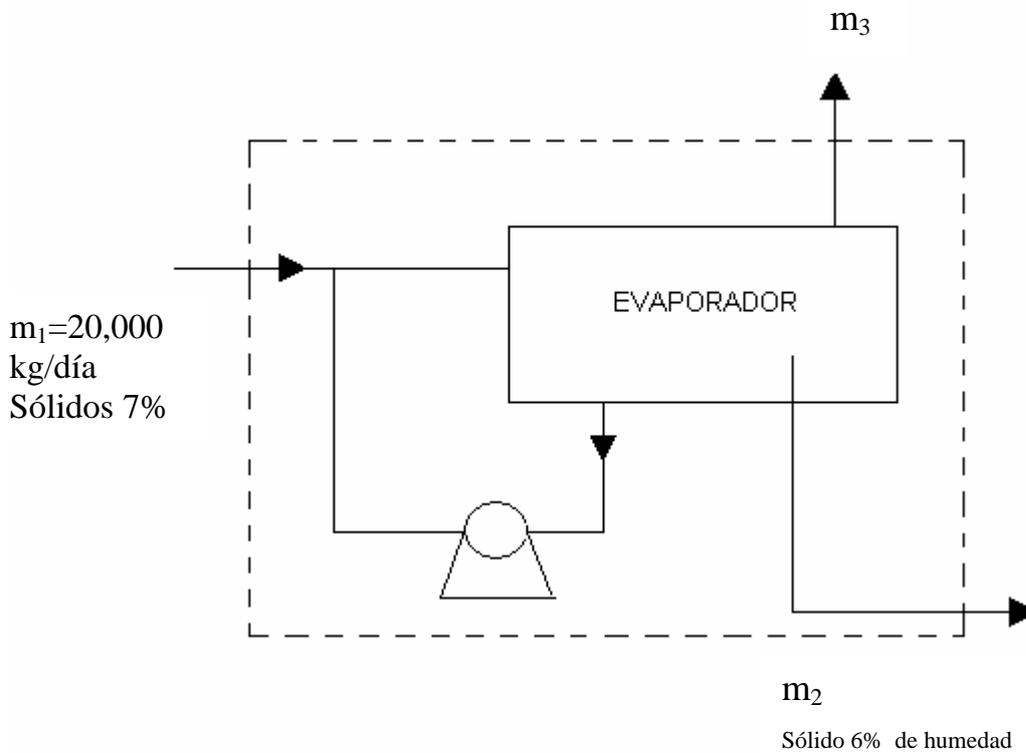
Calculamos $A = L * \Pi * D = 6 m * \Pi * 2.54 cm * \frac{1m}{100cm} = 0.478 m^2$

Por lo tanto se requieren No. de tubos = $\frac{16.84m^2}{0.478m^2} = 35.17$

Por razones de diseño se necesitarán 36 tubos de 3 m de largo en un arreglo de 6 * 6, y se necesitarán construir 2 módulos (evaporadores) iguales.

Respecto a la bomba que vamos a utilizar conociendo que necesitamos evaporar 20,000 litros igual a $952 \frac{kg}{h} * \frac{1h}{60min} = 15.87 \frac{kg}{min}$

Haciendo el balance de materia y sabiendo que nuestra tasa de recirculación en el evaporador piloto es de 1:6 y considerando densidad = 1 g/ml. Calculamos que:



BALANCE GENERAL: $m_1 = m_2 + m_3 \dots \dots \dots (a1)$

BALANCE SOLIDO: $X_1 m_1 = X_2 m_2 \dots \dots \dots (a2)$

BALANCE LIQUIDO: $(1 - X_1) m_1 = (1 - X_1) m_2 + m_3 \dots \dots (a3)$

De acuerdo a los datos obtenemos que $m_1 = 20,000 \text{ kg/día}$, $X_2 = 0.94$, $X_1 = 0.07$. Conociendo estos valores despejamos m_2 de la ec. (a2).

$$m_1 = 20000 \frac{\text{kg}}{\text{día}} * \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ hrs}} * \frac{1 \text{ hr}}{60 \text{ min}} = 15.87 \frac{\text{kg}}{\text{min}}$$

Obtenemos que: $m_2 = \frac{X_1 m_1}{X_2} =$

$$\frac{0.07 * 15.87}{0.94} = 1.182 \frac{\text{kg}}{\text{min}} = m_2$$

despejando m_3 de (a1) se obtiene que: $m_3 = m_1 - m_2 = 15.87 - 1.182 = 14.69 \frac{\text{kg}}{\text{min}}$

Conociendo el valor de m_3 y la tasa de recirculación 1:6 en base a evaporador piloto. Calculamos en base a la información técnica en cuanto a potencia requerida para bombeo encontrada en la literatura [9]. Se obtuvo una potencia técnica de 0.327 Kw equivalente en 0.327 Kw = 0.438 HP. Por lo que se necesitará una bomba comercial de ½ HP.

Calculo en cuanto el costo de vapor

¿Cuánto me cuesta la tonelada de vapor? y ¿Cuánto voy a gastar al día de operación?

Conociendo que tenemos que evaporar $20,000 \frac{\text{kg}}{\text{día}}$ y si el vapor me cuesta 500

$\frac{\$}{\text{Ton}}$ obtenemos que:

$$20,000 \frac{\text{kg}}{\text{día}} * \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ hrs}} * \frac{1 \text{ hr}}{3600 \text{ s}} * \frac{1 \text{ Ton}}{1000 \text{ kg}} * \frac{\$500}{\text{Ton}} * \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ hr}} * \frac{24 \text{ hrs}}{1 \text{ día}} = \$10,000$$

Anualmente considerándose 313 días de trabajo hábiles se obtiene:

$$\frac{\$10,000}{\text{dia}} * \frac{313\text{días}}{\text{año}} = \$3,130,000 \text{ anual de vapor requerido}$$

Respecto a la mano de obra van a ser 3 turnos de 7 h por día y se necesitarán 2 personas por turno para la operación del equipo con un pago de \$ 150 por persona. Por lo que se calcula un pago de \$300 por turno y \$900 al día de operación.

$$\frac{\$900}{\text{dia}} = \frac{365\text{días}}{\text{año}} = \frac{\$328,500}{\text{año}}$$

Después de realizar los balances de materia y energía del evaporador de tubos horizontales presentamos los costos para la elaboración del evaporador propuesto para solucionar el problema presentado por Penwalt.

DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
TUBERIA DE 10" ACERO INOXIDABLE 1/8" DE ESPESOR CON COSTURA DE 6.10 METROS DE LARGO	1	\$20,825.29	\$20,825.29
TUBERIA DE 1" ACERO INOXIDABLE CAL: 16 DE ESPESOR ORNAMENTAL DE 6.10 METROS DE LARGO	36	\$1,338.34	\$48,180.24
TUBERIA DE 1/2" ACERO INOXIDABLE CAL: 18 DE ESPESOR ORNAMENTAL DE 6.10 METROS DE LARGO	14	\$1,536.40	\$21,509.60
PLACA DE ACERO INOXIDABLE; 1/4" DE ESPESOR DE 5 METROS CUADRADOS	1	\$2,130.00	\$2,130.00
SOLDADURA	20	\$154.00	\$3,080.00
ACCESORIOS (CODOS, T's, NIPLES COPLES, ETC)		\$5,000.00	\$5,000.00
MANO DE OBRA			\$76,580.10
BOMBA 1/2 HP	1	\$800.00	\$800.00

TOTAL

\$178,105.23

En las Fig. 3.1.7.a y 3.1.7.b, se presentan algunas imágenes del evaporador y un diagrama de proceso en un solo plano del evaporador piloto que se realizó, para comprender la descripción del proceso de evaporación que se propuso.



Fig. 3.1.7.a Evaporador de Tubos horizontales

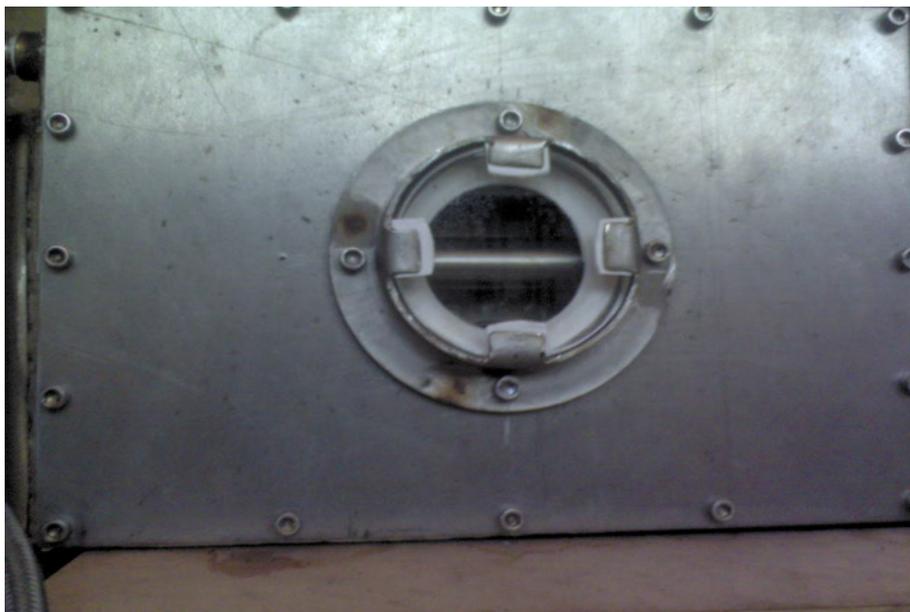
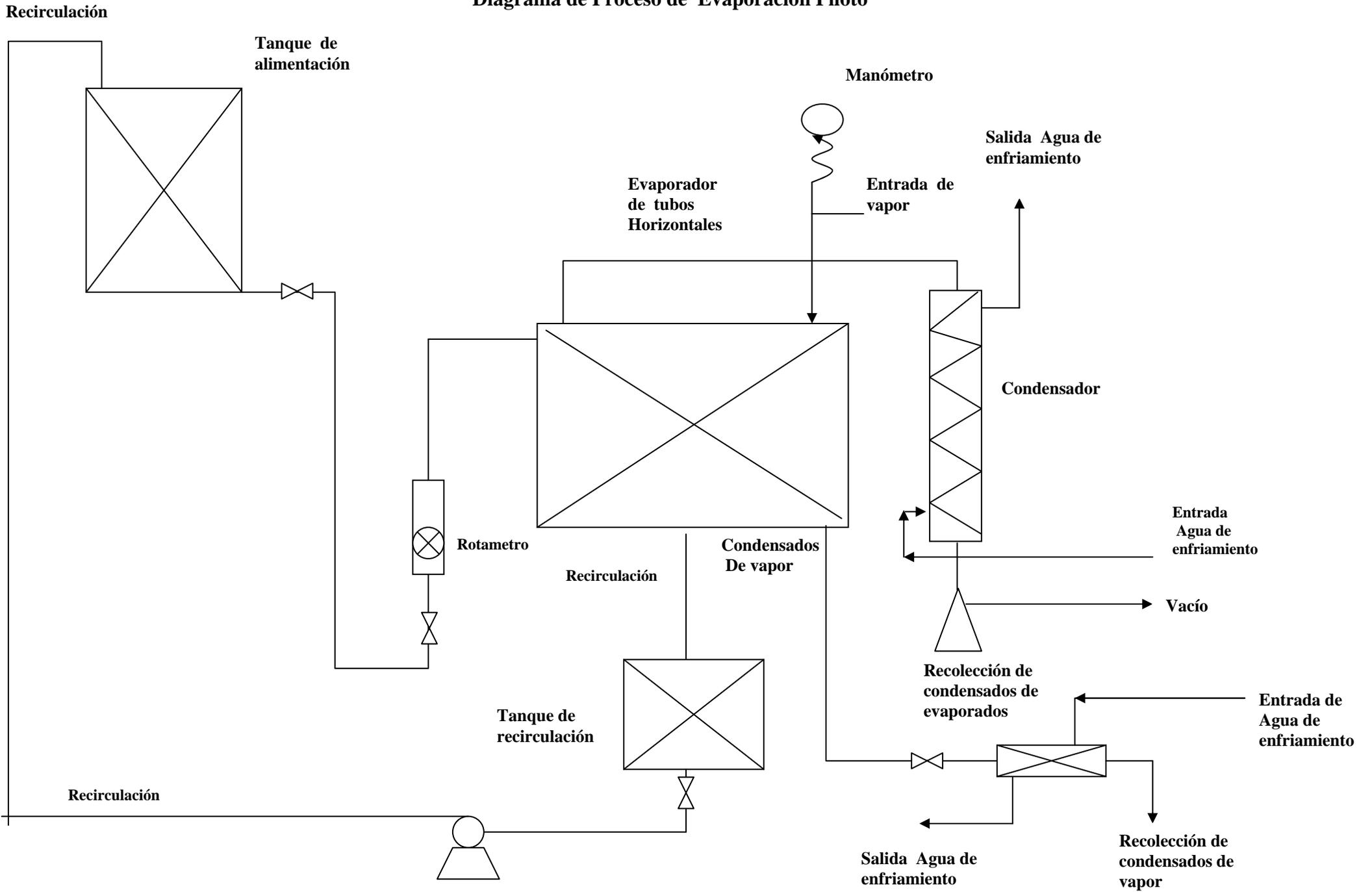


Fig. 3.1.7.b Evaporador de Tubos horizontales

Diagrama de Proceso de Evaporación Piloto



ESTUDIO ECONÓMICO A 10 AÑOS DEL EVAPORADOR DE TUBOS HORIZONTALES

AÑO	DEPRECIACIÓN ANUAL	DEPRECIACIÓN ACUMULADA	VALOR
0			178,105.23
1	3,205.89	3,205.89	174,899.34
2	3,205.89	6,411.78	171,693.45
3	3,205.89	9,617.67	168,487.56
4	3,205.89	12,823.56	165,281.67
5	3,205.89	16,029.45	162,075.78

$$(178105.23 / 5) * 0.09^* = \$ 3,205.89$$

ADAPTACIÓN (cambio de tubos y mano de obra) \$86,470.29

AÑO	DEPRECIACIÓN ANUAL	DEPRECIACIÓN ACUMULADA	VALOR
6	4,473.83	4,473.83	248,546.07
7	4,473.83	8,947.66	244,072.24
8	4,473.83	13,241.49	239,598.41
9	4,473.83	17,895.32	235,124.58
10	4,473.83	22,369.15	230,650.75

$$(248,546.07 / 5) * 0.09 = \$4,473.83$$

Sabemos que anualmente pagamos \$3,130,000 de vapor requerido y de mano de obra se paga anualmente \$328,500 por lo que sumando los 2 nos da un total de \$3,458,500

En 10 años obtenemos que $\frac{\$3,458,500}{1\text{año}} * 10\text{años} = \$34,585,000$

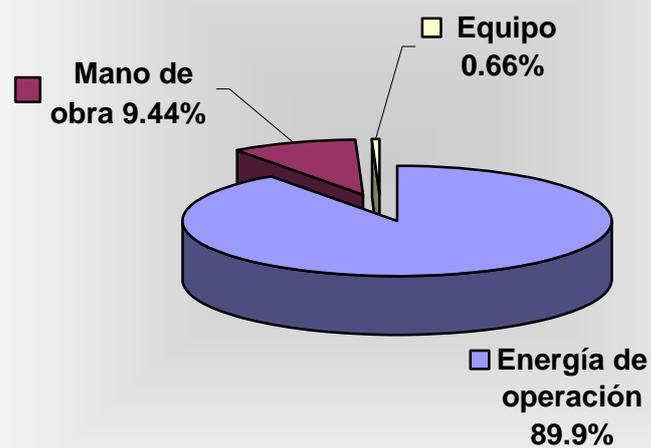
Y sumando el valor del equipo en 10 años sumamos $230,650.75 + 34,585,000 = \$34,815,650.75$

* % de depreciación de maquinaria y equipo para la industria química. Fisco Agenda 2007.

Por lo que gastamos \$3,481,565.075 cada año para evaporar lo que necesitamos, de este modo calculamos cuanto me cuesta evaporar 1m³.

$$\frac{\$3,481,565.075}{1\text{año}} * \frac{1\text{año}}{313\text{días}} = \frac{\$11,123.21}{\text{día}} * \frac{1\text{día}}{20\text{m}^3} = \frac{\$556.16}{\text{m}^3}$$

**Gráfica de gastos en el evaporador de tubos horizontales
(anual)**



3.2) DESCRIPCIÓN DEL INVERNADERO

3.2.1) Introducción

Un Invernadero ha sido definido por diversos autores como *“un islote ecológico cuyo microclima es totalmente diferente al clima del espacio que le rodea”* por ello el constructor del invernadero lo que busca es, mediante una serie de acciones, modificar el clima en la mayor medida, para que este se adapte lo máximo posible a las necesidades requeridas referentes a humedad y temperatura principalmente. No obstante, en ocasiones dicho microclima no se adapta en su totalidad a las necesidades, lo que produce descensos en la producción, o mejor dicho, produce un descenso en el rendimiento.

La temperatura del aire contenido en el interior del invernadero es el balance del calor producido por la energía que accede al interior del invernadero procedente del sol, y la emisividad del invernadero, es decir, la pérdida de calor por parte del suelo, plantas. etc., que sale al exterior atravesando la cubierta.

La Humedad del aire tiene una importancia muy significativa en los resultados deseados, ya que es la reguladora de las pérdidas de agua por evaporación del suelo y por transpiración de las plantas. A una temperatura elevada se da una humedad relativa pequeña, mientras que a una temperatura baja le corresponde una humedad relativa elevada, debido a que cuanto menor sea la temperatura del aire, menor cantidad de vapor de agua es necesario para saturarse.

Agua en la atmósfera

La atmósfera contiene agua en forma de:

- vapor que se comporta como un gas
- pequeñas gotitas líquidas (nubes)
- cristalitos de hielo (nubes)

Agua contenida en la atmósfera

- Contiene unos 12 000 km³ de agua

- Entre 0 y 1800 m está la mitad del agua
- Se evaporan (y licuan) unos 500 000 km³/año
- Evaporación potencial en l/m²/año:
 - en océanos: 940 [mm](#)/año
 - en continentes: 200-6000 mm/año

Al año se **evaporan 500 000 km³** de agua, lo que da un valor medio de **980 l/m² o mm**. Es decir es como si una capa de 980 mm (casi un metro) de agua que recubriera toda la Tierra se evaporara a lo largo del año. Como en la atmósfera permanecen constantemente sólo **12 000 km³**, quiere decir que la misma cantidad de 500 000 km³ que se ha evaporado vuelve a caer en forma de precipitaciones a lo largo del año. Aunque la media, tanto de la evaporación como de la precipitación sea de 980 mm, la distribución es irregular, especialmente en los continentes. En los desiertos llueve menos de 200 mm y en algunas zonas de montaña llueve 6000 mm o más.

La evaporación del agua de mar para la producción de sal común ha sido practicada desde tiempo antiguos, y es todavía utilizada en los alrededores del mundo donde las condiciones climatológicas son favorables. Estos evaporadores consisten, en su forma más elemental, de una serie de piletas o estanques grandes, en los cuales la solución es concentrada mediante energía solar como medio de calentamiento. Esto es seguido por una evaporación adicional al pasar por estanques naturales abiertos de gran tamaño o áreas de cristalización.

Este proceso depende de gran parte de las condiciones climatológicas del lugar en donde se está ubicado, dichas condiciones son la humedad, velocidad del viento y la intensidad de la radiación solar, todo lo anterior se presenta como su principal desventaja. Sus ventajas sustentan una baja inversión capital y sobre todo el costo nulo de la energía solar.

3.2.2) Importancia del Invernadero

Recordemos que Petroquímica Pennwalt ha venido procesando normalmente sus productos. De estos procesos viene obteniendo como residuo entre 15 y 20 m³ de agua contaminada con diversos elementos principalmente sales. Esta agua residual proviene de su planta de tratamiento obteniendo como resultado una agua que cumple con los principales factores para su descarga, es decir DBO y DQO, sin embargo muy alta en contenido de sales totales aproximadamente entre el 6 y 7% además de VOCs y fuertes olores.

Con este problema planteado se propuso la opción de llevar a cabo la evaporación mediante un invernadero. Se sabe que las condiciones de un invernadero siempre han permitido obtener producciones deseadas, de calidad y mayores rendimientos, en cualquier momento del año. Tomando como base las necesidades que tenemos de evaporación nuestro invernadero estará condicionado por dos factores ambientales o climáticos: **temperatura y humedad relativa.**

Para el problema que tenemos haremos mención de los factores que nos ayudarán a cumplir nuestras necesidades que son temperatura y humedad relativa.

Temperatura.

Este es el parámetro más importante a tener en cuenta en el manejo del ambiente dentro de un invernadero.

La temperatura en el interior del invernadero, va a estar en función de la radiación solar, comprendida en un intervalo entre 200 y 4000 nm, la misión principal del invernadero será la de acumular calor durante las épocas invernales.

El calentamiento del invernadero se produce cuando el infrarrojo largo, procedente de la radiación que pasa a través del material de cubierta, se transforma en calor. Esta radiación es absorbida por las plantas, los materiales de la estructura y el suelo. Como consecuencia de esta absorción, éstos emiten radiación de longitud de onda más larga, que tras pasar por el obstáculo que

representa la cubierta, se emite radiación hacia el exterior y hacia el interior, calentando el invernadero.

El calor se transmite en el interior del invernadero por radiación, conducción y por convección, tanto calentando como enfriando. La conducción es producida por el movimiento de calor a través de los materiales de cubierta del invernadero. La convección tiene lugar por el movimiento del calor por las plantas, el suelo y la estructura del invernadero. La infiltración se debe al intercambio de calor del interior del invernadero y el aire frío del exterior a través de las juntas de la estructura. La radiación, por el movimiento del calor a través del espacio transparente.

Humedad Relativa.

La humedad es la masa de agua en unidad de volumen, o en unidad de masa de aire. La humedad relativa es la cantidad de agua contenida en el aire, en relación con la máxima que sería capaz de contener a la misma temperatura.

Existe una relación inversa de la temperatura con la humedad, por lo que a elevadas temperaturas, aumenta la capacidad de contener vapor de agua y por tanto disminuye la Humedad Relativa. Con temperaturas bajas, el contenido en Humedad Relativa aumenta.

Experimentación en el Invernadero

Con la ayuda de grupo Acea S.A. de C.V. se logró llevar a cabo la construcción de un invernadero piloto para proponer una solución al problema planteado. Se propuso instalar un invernadero minigreen como prototipo para recopilar información y estudiar el fenómeno de la evaporación “ in-situ “ y al mismo tiempo se establecieron las pruebas de evaporación en un invernadero ubicado en su planta de Texcoco, donde se probaron varios materiales textiles sumergidos parcialmente con la esperanza de aumentar a capacidad evaporativa, entre los cuales destacaron las tiras de manta de algodón. Sin embargo, comparando con el testigo en donde no se utilizaba ningún material textil la diferencia fue mínima es decir; el algodón tardó 14 días y el testigo 13 días. Esto nos llevó a

concluir que no vale la pena agregar al sistema ningún textil ya que el beneficio es mínimo.

3.2.3) Descripción del invernadero piloto.

Para la construcción del invernadero piloto tipo minigreen se consideró:

- Una superficie de 60 m²
- Nivelación de la superficie
- Construcción de tina de 55.86 m² con una base de arena amortiguadora y elaboración de la propia tina a base de tabiques cal y cemento con una altura de 20 cm.
- Estructura de Acero galvanizado debido a su fácil manejo, estética y funcionalidad.
- Geomembrana para la tina de tal manera que, quede totalmente forrada y de una sola pieza. Esta geomembrana es un polímero diseñado contra rayos UV para con ello retrasar su desgaste además de ser de color negro para favorecer a la evaporación de nuestra sustancia problema y de un calibre de 1.5 mm. Por su durabilidad y resistencia.
- Altura de 3.0 m.
- Ventanas de 1.5 m de alto por 9 m de ancho. Además de contar con cortinas con un despliegue ascendente y descendente para su fácil manejo y con ello poder controlar mejor la temperatura del invernadero.
- Se consideraron diferentes maneras de colocación del agua problema y la más efectiva y fácil fue por medio de una tubería con pequeños orificios de 3/16" para su fácil fluidez y evitar taponamientos

En la Fig. 3.2.3.a y 3.2.3.b se presenta un esquema del invernadero piloto y una imagen del mismo.

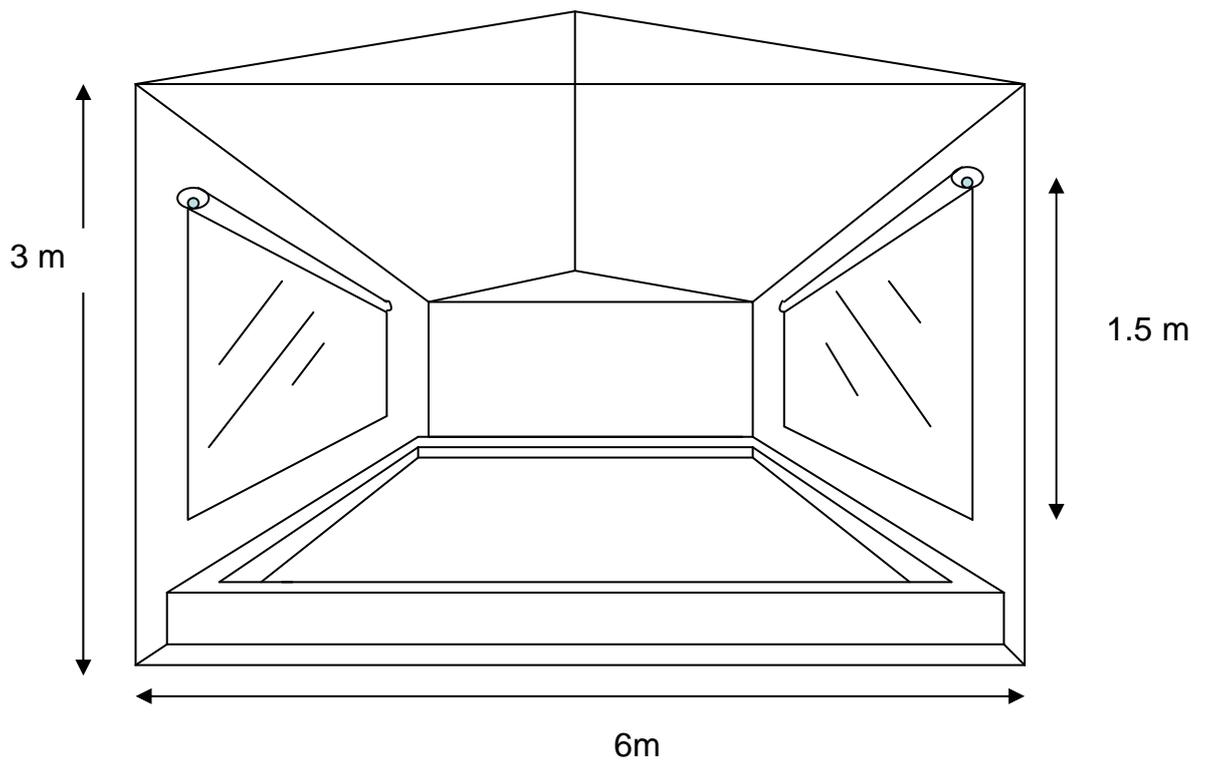


Fig. 3.2.3.a Esquema del invernadero Piloto



Fig. 3.2.3.b Imagen del invernadero Piloto

En la siguiente imagen Fig. 3.2.3.c podemos observar la cantidad de sales que son el resultado de la evaporación además de el tubo para llevar a cabo la alimentación del agua problema.



Fig. 3.2.3.c Imagen de sales derivadas de la evaporación

En la siguiente imagen fig.3.2.3.d, se muestra un sistema de extracción por medio de un extractor tipo zanahoria del cual no haremos mención debido a que no dio ningún resultado siendo mas eficientes las ventanas para la circulación del aire.

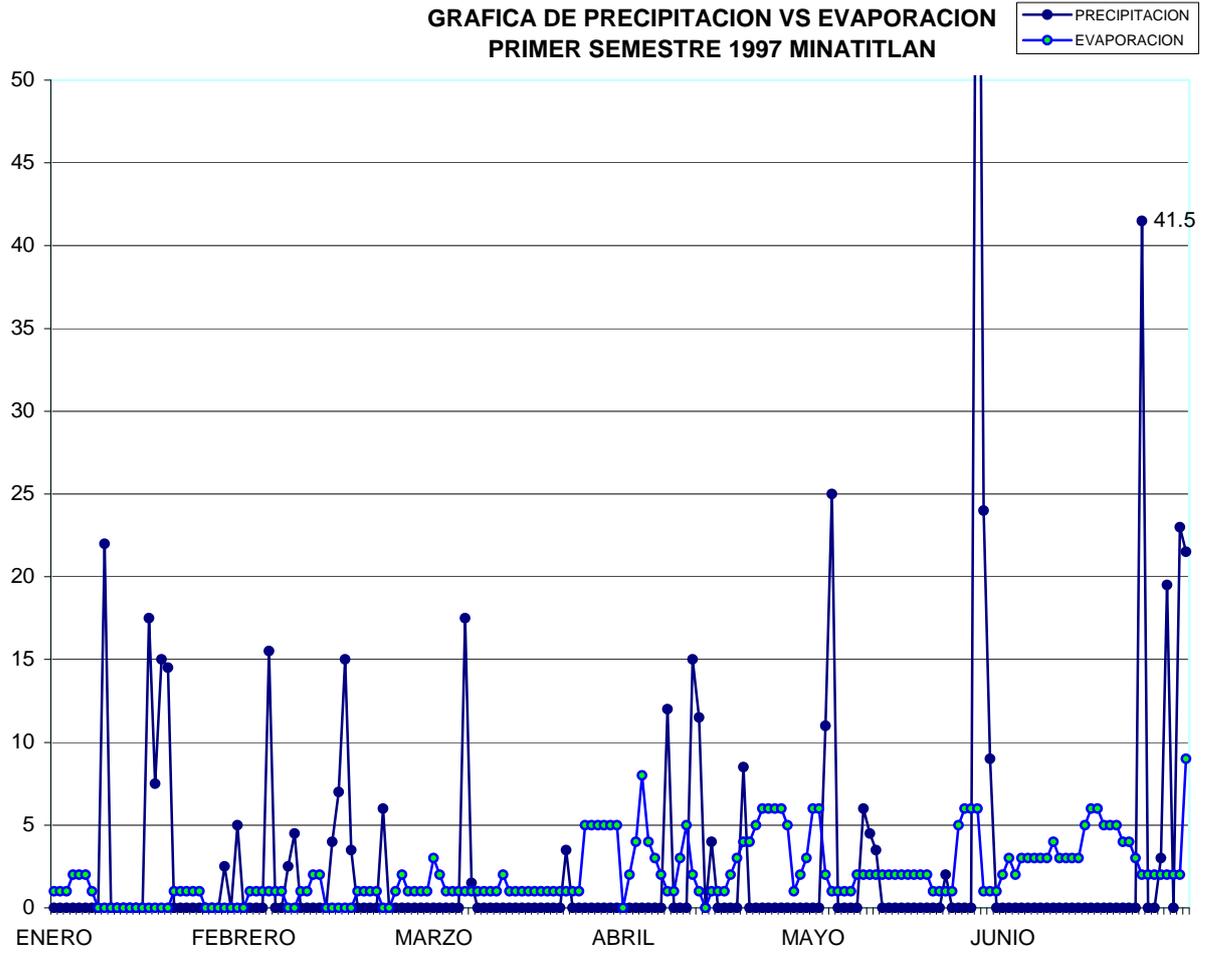


Fig. 3.2.3.d Imagen de Extractor tipo zanahoria

Se hicieron además una serie de repeticiones en donde se han presentado muy variadas condiciones climáticas (soleado, medio nublado y nublado). En ellas, encontramos que aún en las peores condiciones climáticas, la capacidad evaporativa mínima por día fue de 2mm. En condiciones favorables fue de 7mm por día. Al mismo tiempo fueron corridas las pruebas en Coatzacoalcos por grupo Acea encontrando resultados similares.

Se consultaron las condiciones climáticas de la zona en la estación meteorológica número 30107 de Minatitlán Veracruz. Mostramos como ejemplo el año 1997 el cual representa un año típico.

**GRAFICA DE PRECIPITACION VS EVAPORACION
PRIMER SEMESTRE 1997 MINATITLAN**



COBERTURA DEL CIELO MINATITLAN VER.

clave 30107 lat=17.98 long=94.53 año 1997

días	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic
1	1	2	0	2	0	1	2	2	2	2	1	2
2	1	2	1	1	0	1	2	2	2	2	1	2
3	1	2	2	1	2	1	2	2	2	2	2	2
4	1	2	2	0	2	1	1	2	2	2	2	2
5	1	2	1	1	2	1	2	2	2	2	2	2
6	0	2	2	1	2	1	2	2	2	2	2	2
7	2	2	2	1	2	1	2	2	2	2	2	2
8	2	2	2	1	1	1	2	2	2	2	2	2
9	2	2	2	2	2	0	1	2	2	2	2	1
10	2	2	2	1	2	1	1	1	2	2	2	1
11	2	2	2	0	1	1	1	2	2	2	2	2
12	2	1	1	2	1	1	2	2	2	1	1	2
13	2	1	1	2	1	1	2	2	2	1	1	2
14	2	2	1	2	1	0	2	2	2	2	1	2
15	2	2	1	2	2	0	2	2	2	2	2	2
16	2	2	1	2	2	0	2	2	2	2	2	2
17	2	2	1	2	2	0	1	2	2	2	2	2
18	2	2	1	2	1	0	1	2	2	2	2	2
19	2	2	1	1	1	0	1	2	2	2	2	2
20	2	2	2	1	2	1	1	2	2	2	2	2
21	2	2	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2
22	2	2	1	0	2	1	1	2	2	2	2	2
23	1	2	1	0	1	1	2	2	1	1	2	1
24	1	2	1	0	0	2	2	2	1	1	2	1
25	2	2	0	0	0	1	2	2	2	0	2	1
26	2	0	0	0	0	1	1	2	2	1	2	2
27	2	2	0	1	1	1	2	2	2	2	2	2
28	2	0	0	1	2	1	1	1	1	2	2	2
29	2		0	1	2	2	1	2	2	2	2	2
30	2		0	1	2	2	2	2	2	2	2	2
31	2		2		1		2	1		1		2

0 SOLEADO	30
1 DIA MEDIO NUBLADO	104
2 NUBLADO	231

De la información antes expuesta podemos estimar una evaporación mínima promedio de 2 L/m²/día lo que nos lleva a esperar que en 10,000 m² podemos tener evaporados 20 m³ diarios cantidad suficiente para las necesidades actuales.

A continuación presentamos la Tabla con la información obtenida de la experimentación.

FECHA	Nivel (mm)	mm evapo con pendiente de 39°	mm vertical evap	Vol Total (m ³)	Vol. Evap Litros	AREA (m ²)	TEMP EXT	TEMP. INT.	HUMEDAD REL EXT	HUMEDAD REL INT.	clima
20-Oct-05	192	2.00	148.80	5.165	68.00	34	28.2	28.3	72	72	nublado
21-Oct-05	189	3.00	146.48	5.080	102.00	34	35.7	34.4	44	50	soleado
22-Oct-05	186	3.00	144.15	4.997	102.00	34	36.2	32.4	50	54	soleado
23-Oct-05	184	2.00	142.60	4.940	68.00	34	39.2	40	40	47	soleado
24-Oct-05	178	4.00	137.95	4.772	204.00	34	34.5	31	64	62	soleado
25-Oct-05	173	5.00	134.08	4.633	170.00	34	35	34.3	62	50	soleado
26-Oct-05	170	3.00	131.75	4.550	102.00	34	35.7	34.4	44	50	soleado
27-Oct-05	165	5.00	127.88	4.411	170.00	34	36.2	32.4	50	54	soleado
28-Oct-05	161	4.00	124.78	4.94	136.00	34	39.2	40	40	47	soleado
29-Oct-05	157	4.00	121.68	4.77	136.00	34	34.5	31	64	62	soleado
30-Oct-05	152	5.00	117.80	4.63	170.00	34	35	34.3	62	50	soleado
31-Oct-05	149	3.00	115.48	4.55	102.00	34	35.7	34.4	44	50	soleado
01-Nov-05	145	4.00	112.38	4.41	136.00	34	36.2	32.4	50	54	soleado
02-Nov-05	141	4.00	109.28	4.30	136.00	34	39.2	40	40	47	soleado
03-Nov-05	138	3.00	106.95	4.19	102.00	34	34.5	31	64	62	soleado
04-Nov-05	136	2.00	105.40	4.05	68.00	34	35	34.3	62	50	soleado
05-Nov-05	134	2.00	103.85	3.97	68.00	34	35.7	34.4	44	50	soleado
06-Nov-05	129	3.00	99.98	3.86	204.00	34	36.2	32.4	50	54	soleado
07-Nov-05	124	4.00	96.10	3.75	272.00	34	39.2	40	40	47	soleado
08-Nov-05	119	4.00	92.23	3.67	204.00	34	34.5	31	64	62	soleado
09-Nov-05	114	4.00	88.35	3.61	204.00	34	35	34.3	62	50	soleado

Como sabemos que en cada metro cuadrado cada milímetro de altura corresponde a un litro, y en los experimentos realizados se cuenta con una área promedio de 34 metros cuadrados. Tomando como ejemplo el día 21 de octubre que se contó con un clima soleado se evaporaron 3 milímetros de altura en el área mencionada dando un total de 102 litros. Resultado muy favorable para nosotros.

Después de realizar la experimentación en este tipo de invernadero minigreen y obtener resultados satisfactorios, con ayuda de grupo Acea S.A. de C.V. se propone que para la cantidad de agua problema a evaporar, es necesario un invernadero tipo batisierra (Fig. 3.2.3.e), debido a que nos proporciona mayor circulación de aire en el interior removiendo constantemente la cantidad de vapor contenida en el ambiente.



Fig. 3.2.3.e Imagen representativa de un invernadero TIPO “Batisierra” (vista trasera)

A continuación se presenta los costos que nos llevaría a construir este tipo de invernadero.

Para la construcción de nuestro invernadero con las dimensiones requeridas de 10,000 m² presentamos los costos que nos llevarían en su construcción:

RESUMEN DE COSTOS DEL INVERNADERO	CANTIDAD	P.U.*	SUMA
FABRICACION DE ESTRUCTURA, EN ACERO GALV.	1.00	1,190,781.10	1,221,338.96
CORTINAS Y VENT.	1.00	52,619.21	52,619.21
SUMINISTROS	1.00	123,198.61	123,198.61
POLIETILENOS	1.00	166,918.25	166,918.25
MALLAS	1.00	49,776.36	49,776.36
MECANIZACION	1.00	104,242.18	104,242.18
DIRECCION TECNICA PARA EL MONTAJE (incluye viáticos)	1.00	72,326.56	72,326.56
FLETE DE MATERIALES AL LUGAR DE LA OBRA.	3.00	8,000.00	24,000.00
MANO DE OBRA DIRECTA PARA INSTALACIÓN Y CONSTRUCCIÓN	1100.62	280.00	308,174.03
MATERIALES PARA CIMENTACIÓN.	471.00	60.00	28,260.00
POLIETILENOS PARA LA CUBIERTA SEGUNDA CAPA, PLASTERMIC	1.00	103,857.42	103,857.42
TRASLUCIDO CAL. 720 TRATADO CONTRA UV PARA TRES AÑOS.			
SISTEMA INFLADOR PARA DOBLE CAPA CON TURBO SOPLADOR, MANGUERAS	16.00	1,700.00	27,200.00
CORRUGADAS CON BRIDAS DE CONEXIÓN A PLÁSTICOS, CABLE DE USO RUDO			
TABIQUE PARA TINAS	50 millares	1,200.00	60,000.00
CEMENTO PARA CONSTRUCCIÓN DE TINAS	3 toneladas	1,300.00	3,900.00
GRAVILLA	25 carros	1,000.00	25,000.00
ARENA PARA CONSTRUCCIÓN DE TINAS	25 carros	1,000.00	25,000.00
CAL PARA CONSTRUCCIÓN DE TINAS	30 toneladas	1,000.00	30,000.00
MANO DE OBRA CONSTRUCCIÓN DE TINAS		71,950.00	71,950.00
GEOMEMBRANA		\$510,000.00	\$510,000.00
		SUBTOTAL	\$3,007,761.28
		SUMA	\$3,007,761.28
		I.V.A.TASA 0%	\$0.00
		TOTAL	\$3,007,761.28

*P.U. = Precio por unidad en pesos

**ESTUDIO ECONOMICO A 10 AÑOS DEL INVERNADERO TIPO
"BATISIERRA"**

AÑO	DEPRECIACIÓN ANUAL	DEPRECIACIÓN ACUMULADA	VALOR
0			3,007,761.28
1	90,232.84	90,232.84	2,917,528.44
2	90,232.84	180,465.68	2,827,295.60
3	90,232.84	270,698.52	2,737,062.76

$$(3,007,761.28 / 3) * 0.09 = 90,232.84$$

ADAPTACIÓN (polietilenos y mano de obra) 284,314.45

AÑO	DEPRECIACIÓN ANUAL	DEPRECIACIÓN ACUMULADA	VALOR
4	90,641.31	90,641.31	3,021,377.21
5	90,641.31	181,282.62	2,930,735.90
6	90,641.31	271,923.93	2,840,094.59

$$(3,021,377.214 / 3) * 0.09 = 90,641.31$$

ADAPTACIÓN (polietilenos, geomembrana y mano de obra) 819,814.45

AÑO	DEPRECIACIÓN ANUAL	DEPRECIACIÓN ACUMULADA	VALOR
7	82,347.95	82,347.95	3,659,909.05
8	82,347.95	164,695.90	3,577,561.10
9	82,347.95	247,043.85	3,495,213.15

10	82,347.95	329,391.80	3,412,865.2 0
----	-----------	------------	------------------

$$(3,659,909.048 / 4) * 0.09 = 82,347.95$$

* % de depreciación de maquinaria y equipo para la industria química. Fisco Agenda 2007.

Costos de operación para el invernadero.

Para la operación del invernadero van a ser 2 personas por turno y van a ser 2 turnos de 7 horas.

A cada uno se le paga \$150, por lo que por turno se gasta \$300 en mano de obra, y al día serán \$600.

En un año se pagará $\frac{\$600}{\text{dia}} * \frac{365\text{días}}{1\text{año}} = \$219,000\text{anuales}$ multiplicado por 10 años obtenemos un total de \$2,190,000.

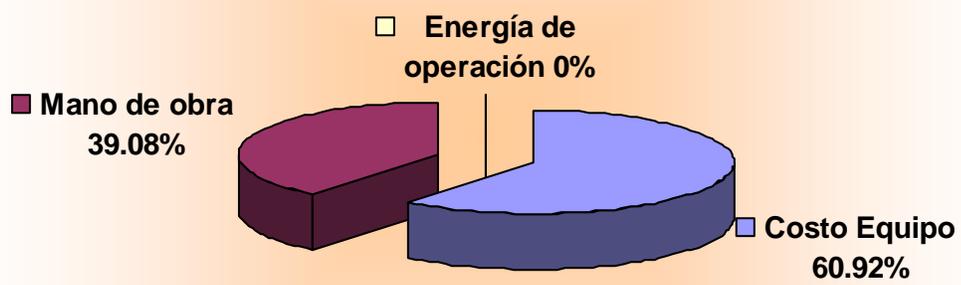
Sumando el valor de nuestro equipo en 10 años y el costo de operación en 10 años obtenemos que:

$$\$2,190,000 + \$3,412,865.2 = \$5,602,865.2$$

Por lo que anualmente gastamos \$560,286.52 para lo que necesitamos evaporar. De igual manera se calcula cuánto cuesta evaporar 1m³:

$$\frac{\$560,286.52}{1\text{año}} * \frac{1\text{año}}{313\text{días}} = \frac{\$1790.05}{\text{dia}} * \frac{1\text{dia}}{20\text{m}^3} = \frac{\$89.5}{\text{m}^3}$$

Gráfica de gastos en el invernadero "Batisierra" (anual)



CAPITULO IV

SISTEMA PROPUESTO

4.1 INVERNADERO BATISIERRA

INTRODUCCIÓN

El agua permanece en constante **movimiento**. El vapor de agua de la atmósfera se condensa y cae sobre continentes y océanos en forma de lluvia o nieve. El agua que cae en los continentes va descendiendo de las montañas en ríos, o se infiltra en el terreno acumulándose en forma de aguas subterráneas. Gran parte de las aguas continentales acaban en los océanos, o son evaporadas o transpiradas por las plantas volviendo de nuevo a la atmósfera. También de los mares y océanos está evaporándose agua constantemente. La energía del sol mantiene este ciclo en funcionamiento continuo.

El vapor que se encuentra en la atmósfera procede de la evaporación del agua de los océanos, de los ríos y lagos y de los suelos húmedos. Que se evapore más o menos depende de la temperatura y del nivel de saturación del aire, pues un aire cuya humedad relativa es baja puede admitir mucho vapor de agua procedente de la evaporación, mientras que un aire próximo a la saturación ya no admitirá vapor de agua por muy elevada que sea la temperatura.

El proceso de evaporación mediante un invernadero depende en gran parte de las condiciones climatológicas del lugar en donde esté ubicado. Estas condiciones son humedad, velocidad del viento e intensidad de la radiación solar. Todo lo anterior se presenta como su principal desventaja. Sus ventajas se sustentan en el costo nulo de la energía solar.

4.2 GENERALIDADES DEL INVERNADERO BATISIERRA

Invernadero compuesto por arcos de diente de sierra, en batería su diseño reúne las mayores ventajas para la ventilación natural ya que el diente de sierra cuenta con una apertura de 1.50 metros, por lo que aprovecha al máximo la dinámica natural del aire dentro del invernadero, que combinado con sus paredes perimetrales totalmente ventiladas aseguran de manera óptima los cambios de aire dentro del recinto, logrando así el control adecuado de humedad relativa.

Por otro lado el cierre hermético en cortinas evita problemas debido al ingreso de agua por lluvias. Esto lo hace ideal para climas cálidos y tropicales por su relación ventilación -superficial cubierta

- Es ideal para climas cálidos y tropicales
- Fuerte estructura
- Ventilación interior garantizada (manual, motorizada y automática)
- Excelente desalojo de lluvia con su exclusivo canalón pluvial

El invernadero Batisierra es, sin duda, el invernadero más refinado en su tipo y con los mejores acabados. Es muy resistente y propicia un medio ambiente adecuado en su interior. Esta hecho básicamente de acero galvanizado y es fácil y rápido de ensamblar.

En el problema planteado en el cual se tiene que evaporar agua con cierta cantidad de sales se recomienda el uso de este tipo de invernadero por su resistencia y bajo costo.

4.3) Descripción del invernadero

Para el problema planteado por PENWALT de evaporar de 15,000 a 20,000 litros por día de agua con sales, se propuso el invernadero tipo batisierra. A continuación se muestra su descripción general .

4.4) Descripción general

- Se cuenta con una superficie de terreno de 10, 000 m² con las siguientes medidas; 50 metros de ancho por 200 metros de largo.
- Primeramente se tiene que nivelar todo el terreno en el cual será montado nuestro invernadero.
- Se colocará una base amortiguadora en la cual se colocará primeramente una base de arena y una segunda capa de grava de piedra de tezontle chica o gravilla como es conocida comúnmente. No se recomienda el uso de una base de concreto debido a que es muy frío y se pueden ver afectados los resultados, además de aumentar los costos del invernadero.
- Una vez que se tiene la base, se montará una zapata para la formación de una tina la cual estará hecha con tabiques normales y se colocará una cubierta de cal y cemento de 2 cm de ancho, con las orillas redondeadas para evitar rasgar la geomembrana que se colocará. La tina formada tendrá una profundidad de 40 cm de profundidad. Las dimensiones serán de 9.5 metros de ancho por 20 metros de largo; no olvidando que las tinas estarán unidas a lo largo mientras que a lo ancho las separará un pasillo de 50 centímetros, por donde pasarán 2 tuberías de 2" a todo lo largo para llevar a cada tina el líquido problema por gravedad desde el tanque de almacenamiento teniendo injertos de 1" y 2" por cada tina. Es importante mencionar que la tubería de 2" a su vez estará funcionando como riel para carros recolectores de sales cuando se limpie cada una de las tinas.

- El carrito para la recolección tendrá las dimensiones de 40 cm de ancho por 90 cm de largo únicamente se usará para el transporte de sales obtenidas por la evaporación. Para la construcción del carrito se usarán láminas de 3/16" de acero al carbón; con llantas de goma para no dañar la tubería por la cual se deslizará. Como se muestra en la Fig. 4.4.1

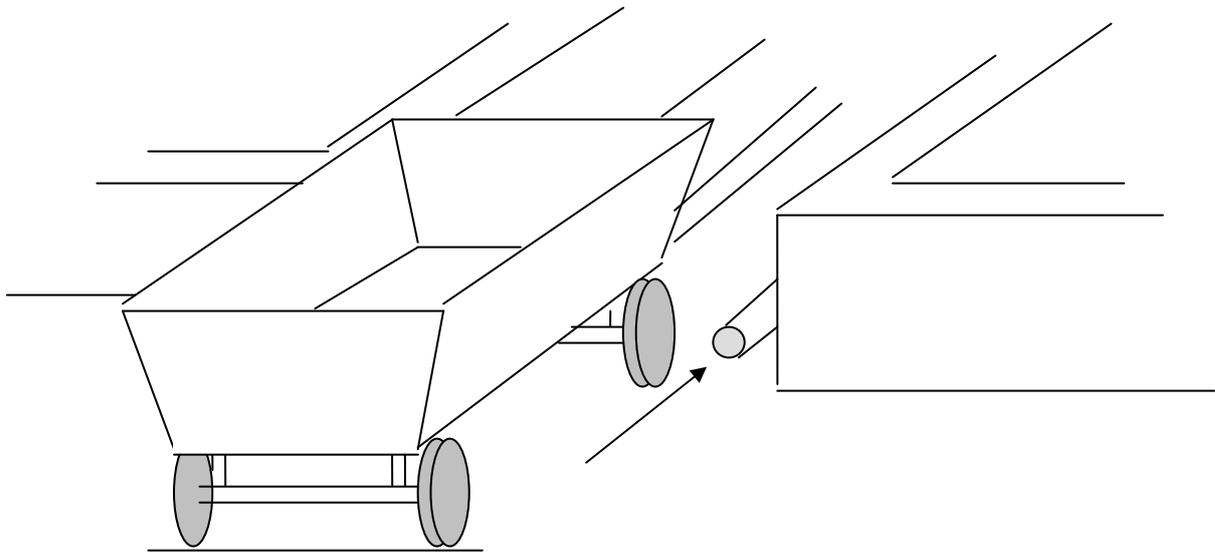


Fig 4.4.1 Carrito transportador de sales trasladado por medio de la tubería de 2" que funciona como su riel.

- Se colocará la geomembrana de tal modo que la tina quede totalmente forrada y de una sola pieza. Esta geomembrana es un polímero diseñado contra rayos UV para con ello retrasar su desgaste además de ser de color negro para favorecer a la evaporación de nuestra sustancia problema. Existen diferentes calibres desde 1 hasta 2.5 mm. Para este problema estamos proponiendo se coloque el de 1.5 mm ya que su costo es moderado y el tiempo de vida es de 7 años.

- Las paredes se harán con estructura de acero galvanizado colocando tuberías en las esquinas y a lo largo de una pared cada 2 metros y se cubrirá con Película fabricada a partir de copolímero EVA (etileno-acetato de vinilo) en calibre 8 mil (200 μ) con un paquete especial de estabilizantes UV resultando en una película térmica altamente transparente. Diseñada para cubierta de invernadero y túneles de cultivo en zonas de condiciones climáticas agresivas. Particularmente recomendable para cubierta de invernadero en climas nublados y fríos, donde se requiere la mayor luminosidad posible dentro del invernadero y a la vez un buen efecto termoaislante. Duración de 36 meses a la intemperie. Elaboradas minuciosamente con co-polímeros de polietileno tienen aditivos especiales para darles alta resistencia al desgarre y contra la degradación solar.
- Se tendrán a los costados ventanas con dimensiones de 2 metros de ancho por 16 metros de largo. Estarán hechas con malla 50 para permitir la circulación del aire en su interior, se contará con cortinas con un despliegue ascendente y descendente para su fácil manejo.
- La Fig. 4.4.2 muestra la vista frontal del invernadero Batisierra

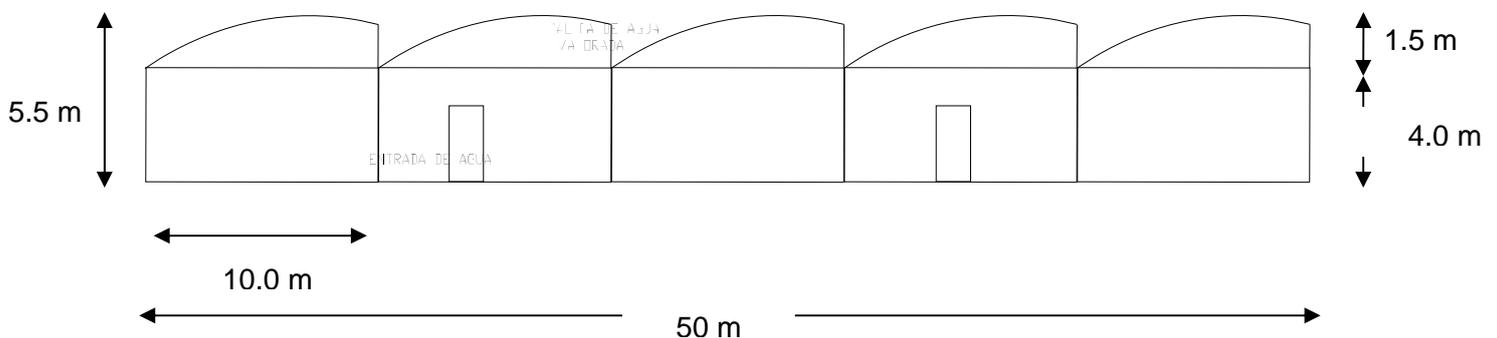


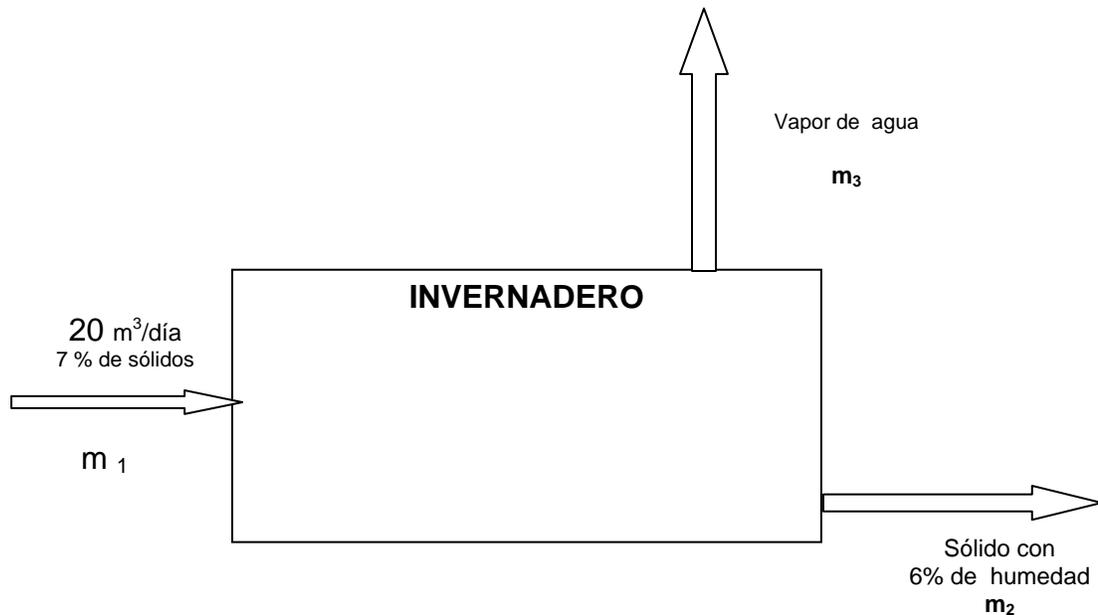
Fig. 4.4.2 Vista Frontal del invernadero Batisierra propuesto.

A continuación se presenta una tabla con las características generales con las que deberá contar el invernadero: además de un esquema donde se muestra el interior del invernadero y de cómo estarán distribuidas las tinas en su interior. Así mismo se logra observar los injertos en las líneas de 2", las cuales transportarán el líquido problema, y servirán a su vez de riel para el carrito transportador de sales residuales. Dichos injertos son de 1" de espesor y cuentan con válvulas de bola para su fácil manejo, de la misma medida . Cada tina cuenta con 4 válvulas para su llenado.

INVERNADERO MODELO: "BATISIERRA"

CARACTERISTICAS PRINCIPALES DEL INVERNADERO

RESISTENCIA AL VIENTO:	120 km/hr COMO VELOCIDAD MAXIMA DE DISEÑO.
CAPACIDAD DE CARGA:	24 kg/m ² DE CARGA DE CULTIVO, COLGADO A LOS ALAMBRES DEL TUTOREO
ALTURA DE COLUMNAS:	4.00 m DE ALTURA AL CANALON EN LAS PAREDES VERTICALES LATERALES.
FABRICACION DE COLUMNAS:	PERIMETRALES E INTERMEDIAS DE PERFIL CUADRADO 2 1/2", CAL. 14, GALVANIZADOS, CADA 3.60 m
FABRICACION DE ARCOS:	DE PERFIL CUADRADO DE 2" CAL. 14, GALVANIZADO, CADA 3.60 m
ALTURA MAXIMA:	6.4 m AL CENIT DE CADA TUNEL.
VENTILA CENITAL:	DE 1.5 m DE ABERTURA, CON MALLA Y CORTINA ENROLLABLE, UNA VENTILA POR TUNEL, MOTORIZADAS
ANCHO DEL TUNEL:	8.5 m ENTRE EJES DE COLUMNAS.
FIJACION DE POLIETILENO:	SE UTILIZA PERFIL POLY-GRAP DE 1-1/8" DE ANCHO, GALVANIZADO, CAL. 22
CANALON PLUVIAL:	DE LAMINA DE ACERO GALVANIZADO CALIBRE 18, DE 45 cm DE DESARROLLO AUTOSOPORTANTE FABRICADO EN PLANTA, PARA SU ENSAMBLE EN CAMPO, VARIAS PIEZAS.
REFUERZO DIAGONAL	NO SE INCLUYE EN ESTE MODELO.
CUBIERTA:	PELICULA DE POLIETILENO IMPORTADO PLASTERMIC LH TRASLUCIDO CAL. 720, TRATADO CONTRA RAYOS U.V. GARANTIZADO PARA 2 AÑOS.
MALLAS:	MALLA ANTIAFIDOS CRISTAL 40 X 25 EN CORTINAS PERIMETRALES Y EN VENTILAS CENITALES.
CORTINAS:	ENROLLABLES CON APERTURA DE 2.6 m DE ALTO EN EL PERIMETRO. MOTORIZADAS, CON BRAZO TELESCOPICO.
PUERTAS:	2.00 LATERALES DE 3.60 m X 3.00 m DE ALTURA, CON PEATONAL Y EXCLUSA, EXTERIOR AVATIBLE DE 3.00 X 2.75 M.



BALANCE GENERAL: $m_1 = m_2 + m_3 \dots (a1)$

BALANCE SÓLIDO: $X_1 m_1 = X_2 m_2 \dots (a2)$

BALANCE LIQUIDO: $(1 - X_1) m_1 = (1 - X_2) m_2 + m_3 \dots (a3)$

Considerando la densidad del líquido = $1 \frac{g}{mL}$ entonces se tiene que:

$20 \frac{m^3}{dia} = 20 \frac{Ton}{dia}$ y por lo que de acuerdo a nuestro esquema $x_1 = 0.07$ y $x_2 = 0.94$
y

Despejando m_2 de la ecuación (a2) se obtiene:

$$m_2 = \frac{X_1 * m_1}{X_2} = \frac{0.07 * 20 \frac{Ton}{dia}}{0.94} = 1.489 \frac{Ton}{dia}$$

Posteriormente procedemos a calcular m_3 despejándola de (a1) obteniendo:

$$m_3 = m_1 - m_2 = 20 \frac{Ton}{dia} - 1.489 \frac{Ton}{dia} = 18.51 \frac{Ton}{dia}$$

4.5) Balance de energía en el invernadero:

Conociendo que $Q_\lambda = mv H_v$ y tomando una temperatura interior en el invernadero $T_{int} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ procedemos primero a calcular la H_v mediante la siguiente ecuación.

$$H_v = 2502.2 - 2.4834(40) + 0.002301(40)^2 - 0.00001974(40)^3$$

$$H_v = 2405 \frac{kJ}{kg}$$

Sabemos que la $mv = 18.51 \frac{Ton}{dia}$ calculada en el balance de materia, por lo que proseguimos a calcular la Q_λ . Substituyendo y obteniendo como resultado lo siguiente.

$$Q_\lambda = 18.51 \frac{Ton}{dia} * \frac{1000kg}{1Ton} * 2405 \frac{kJ}{kg} = 44,516,550 \frac{kJ}{dia} * \frac{1dia}{12hrs} * \frac{1hr}{3600s} = 1030.47 \frac{kJ}{s} = 1030.47kW$$

CAPITULO V

NORMATIVIDAD

5) NORMATIVIDAD

5.1) Introducción

Tanto en México como en todo el mundo existen diferentes normas para que no haya contaminación. No obstante la gravedad del problema de contaminación, no fue sino hasta 1971 cuando el Congreso adoptó medidas estrictas y aprobó la Ley Federal para Prevenir y Controlar la Contaminación Ambiental.

En vista de que la aplicación de esta Ley no obtuvo los resultados esperados fue sustituida, en 1982, por la Ley Federal de Protección al Ambiente (LFPA) que, como la anterior, en pocos años resultó insuficiente para enfrentar las situaciones originadas por una contaminación cada vez mayor.

La gravedad de las circunstancias obligó, en 1987, a modificar algunos artículos de la Constitución para lograr así un control más eficaz del deterioro ambiental. Después de un cuidadoso estudio, el Congreso de la Unión modificó los artículos 27 y 73. Esas reformas, publicadas en el Diario Oficial de la Federación el 10 de agosto, entraron en vigor el día siguiente. Al artículo 27 se le añadió, en 1987, a su párrafo tercero lo siguiente: "Se dictarán las medidas necesarias para ordenar los asentamientos humanos y establecer adecuadas provisiones, usos, reservas y destinos de tierras, aguas y bosques, a efecto de ejecutar obras públicas y de planear y regular la fundación, conservación, mejoramiento y crecimiento de los centros de población para preservar y restaurar el equilibrio ecológico".

Con el fin de preservar y proteger el ambiente del país y sus recursos naturales, las autoridades tienen el derecho de adoptar sobre las tierras y las aguas de la nación las modalidades que dicte el interés público. Esta reforma autoriza al Estado a vigilar la protección integral del ambiente. Otro Artículo Constitucional modificado fue el 73 en su fracción XXIX para facultar al Congreso de la Unión "para expedir las leyes que establezcan la concurrencia del Gobierno Federal, de los gobiernos de los estados y de los municipios, en el ámbito de sus respectivas competencias, en materia de protección al ambiente y de preservación y restauración del equilibrio ecológico". Es fácil deducir que la finalidad de esta reforma fue descentralizar la protección del ambiente obligando a las entidades y municipios a participar en la prevención y restauración del ambiente, tareas que la Constitución limitaba anteriormente a la Federación.

Las reformas a los artículos 27 y 73 facilitaron la elaboración de una nueva ley con objetivos más amplios que las anteriores: La Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA) publicada en el Diario Oficial de la Federación el 28 de enero de 1988 y entró en vigor el 1º de marzo del mismo año. Esta ley es el principal ordenamiento del ambiente. De la Ley algunas de las disposiciones más importantes corresponde a esta Ley: III. La preservación, la restauración y el mejoramiento del ambiente; IV. La protección de las áreas naturales, la flora y fauna silvestres y acuáticas; V. La prevención y el control de la contaminación del aire, agua y suelo. Se modificaron artículos como los siguientes:

Artículo 121. No podrán descargarse o infiltrarse en cualquier cuerpo o corriente de agua o en el suelo o subsuelo, aguas residuales que contengan contaminantes, sin previo tratamiento y el permiso o autorización de la autoridad federal, o de la autoridad local en los casos de descargas en los sistemas de drenaje y alcantarillado de los centros de población.

Artículo 189. Toda persona podrá denunciar ante la Secretaría o ante

autoridades federales o locales todo hecho, acto y omisión de competencia de la Federación que produzca desequilibrio ecológico o daños al ambiente.

Si observamos algún hecho que dañe el ambiente, como por ejemplo una fábrica despidiendo exceso de sustancias tóxicas, o una fuga de agua en la calle, debemos denunciarlo a la autoridad correspondiente y así podrá ser castigado al responsable que lo realizó. Con esto podremos ayudar a que el ambiente este un poco más limpio cada vez.

5.2) Normas Oficiales

Es importante conocer las normas que no permitieron a Penwalt descargar el agua problema a las aguas residuales, por presentar un índice mayor al permitido por diferentes instituciones como la CNA (Comisión Nacional del Agua). Para ello haremos mención de las Normas oficiales que rigen estos términos.

Norma Oficial Mexicana: es la regulación técnica de observancia obligatoria expedida por las dependencias competentes, conforme a las finalidades establecidas en el artículo 40 de la Ley, que establece reglas, especificaciones, atributos, directrices, características o prescripciones aplicables a un producto, proceso, instalación.

Dentro de la comisión nacional del agua se encuentran las siguientes normas que regulan la descarga de aguas residuales de las cuales haremos mención de lo más importante.

Norma Oficial Mexicana Nom-001-Ecol-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.

Recordaremos que:

Las Aguas residuales

Son las aguas de composición variada provenientes de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, de servicios, agrícolas, pecuarios, domésticos, incluyendo fraccionamientos y en general de cualquier otro uso, así como la mezcla de ellas.

Aguas residuales industriales

Las que provienen de los procesos de extracción, beneficio, transformación o generación de bienes de consumo o de actividades complementarias.

Las especificaciones para esta norma son:

Dentro de esta norma su punto 4.1 nos indica que la concentración de contaminantes básicos, metales pesados y cianuros para las descargas de aguas residuales a aguas y bienes nacionales, no debe exceder el valor indicado como límite máximo permisible. El rango permisible del potencial hidrógeno (pH) es de 5 a 10 unidades.

No se deberán descargar o depositar en los sistemas de drenaje y alcantarillado urbano o municipal, sustancias o residuos considerados peligrosos en las normas oficiales mexicanas correspondientes, sustancias sólidas o pastosas que puedan causar obstrucciones al flujo en dichos sistemas, así como los que puedan solidificarse, precipitarse o aumentar su viscosidad a temperaturas de entre 5°C (278°K) a 40°C (313°K) o lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales.

A continuación se muestra una Tabla 5.2.1 de los límites máximos permisibles de algunos elementos.

LIMITES MAXIMOS PERMISIBLES

PARAMETROS (miligramos por litro, excepto cuando se especifique otra)	PROMEDIO MENSUAL	PROMEDIO DIARIO	INSTANTANEO
Grasas y aceites	50	75	100
Sólidos sedimentables (mililitros por litro)	5	7.5	10
Arsénico total	0.5	0.75	1
Cadmio total	0.5	0.75	1
Cianuro total	1	1.5	2
Cobre total	10	15	20
Cromo hexavalente	0.5	0.75	1
Mercurio total	0.01	0.015	0.02
Níquel total	4	6	8
Plomo total	1	1.5	2
Zinc total	6	9	12

Tabla 5.2.1 límites máximos permisibles

Otra de las normas que también encontramos indicada por la CNA es la siguiente **NOM-002-ECOL-1996** de la cual solo haremos mención de lo más desatacado debido a que sus especificaciones son igual a las de la norma anterior

Norma Oficial Mexicana Nom-002-Ecol-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal

Sus límites máximos permisibles están basados en la Tabla 5.2.1.

También encontramos normas que nos indican el límite máximo permisible de emisión a la atmósfera que para nuestro caso en particular no presentó problema alguno debido a que sólo se evaporó agua; de igual manera se hará mención sólo de lo más importante debido a su gran extensión.

Norma Oficial Mexicana NOM-043-ECOL-1993, que establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de partículas sólidas provenientes de fuentes fijas.

CONSIDERANDO

Que las fuentes fijas generan contaminantes como son las partículas sólidas que al combinarse en la atmósfera con otros, deterioran la calidad del aire, por lo que es necesario su control a través del establecimiento de niveles máximos permisibles de emisión que aseguren la preservación del equilibrio ecológico y la protección al ambiente.

Esta norma oficial mexicana establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de partículas sólidas provenientes de fuentes fijas.

Esta norma oficial mexicana es de observancia obligatoria para los responsables de las fuentes fijas que emitan partículas sólidas a la atmósfera, con la excepción de las que se rigen por normas oficiales mexicanas específicas.

ESPECIFICACIONES

Para efectos de esta norma se consideran zonas críticas por las altas concentraciones de contaminantes de la atmósfera que registran, las siguientes: Las Zonas Metropolitanas de la Ciudad de México, Monterrey y Guadalajara, los centros de población de Coatzacoalcos-Minatitlán, Estado de Veracruz; Irapuato-Celaya-Salamanca, Estado de Guanajuato; Tula-Vito-Apaxco, Estados de Hidalgo y de México; Corredor Industrial de Tampico-Madero-Altamira, Estado de Tamaulipas y la zona fronteriza norte.

Los niveles máximos de emisión a la atmósfera de partículas sólidas provenientes de las fuentes fijas, de acuerdo con el flujo de gases son los que se establecen en la tabla 5.2.2.

Tabla 5.2.2 Niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de partículas

Flujo de Gases m³/min	Zonas criticas mg/m³	Resto del Pais mg/m³
5	1536	2304
10	1148	1722
20	858	1287
30	724	1086
40	641	962
50	584	876
60	541	811
80	479	719
100	437	655
200	326	489
500	222	333
800	82	273
1000	66	249
3000	5	157
5000	84	127
8000	69	104
10000	63	95
20000	47	71
30000	40	60
50000	32	48

Para los efectos de cuantificación de las emisiones de partículas sólidas a la atmósfera, deberán utilizarse los procedimientos establecidos en las normas oficiales mexicanas respectivas.

Con ello nos damos cuenta que llevar a evaporación el agua problema presentada por Penwalt cumple con lo permisible por las normas.

ANEXOS

CONCLUSIONES

La contaminación del medio ambiente constituye uno de los problemas críticos en el mundo, por lo que se buscaron alternativas para la solución del problema planteado por Penwalt de desechar entre 15 y 20 m³ de agua contaminada por día, con diversos componentes, principalmente sales de nitratos, la cual proviene de su planta de tratamiento; y que por su alto contenido en sales no pueden formar parte del agua residual. Las alternativas propuestas para lograr desechar el agua fue la de evaporación por medios naturales y térmicos; para los cuales se propuso la evaporación por medio de un evaporador de tubos horizontales utilizando energía no renovable y evaporación natural por medio de un invernadero utilizando energía solar.; cuidando aspectos importantes como los costos de inversión de mantenimiento, y la energía a consumir.

Al hacer comparación de estos 2 sistemas obtuvimos que evaporar 1m³ de solución problema en el evaporador de tubos horizontales nos cuesta \$ 556.16 ($\frac{\$556.16}{m^3}$), en el caso de el invernadero nos cuesta \$89.5 ($\frac{\$89.5}{m^3}$).

Por lo que proponemos la elaboración de un invernadero por su facilidad de operación utilizando energía solar y buen trato al medio ambiente, ya que también cumple con cero descargas requeridas, además de que sus costos de mantenimiento son menores y de fácil operación. Por utilizar energía solar el consumo de energía es mínimo, sabiendo que es el termino clave de la economía mundial por lo que a los actuales procesos se les debe de aplicar una auditoria energética y ambiental, para determinar las áreas en donde se puede hacer una mejoría en el uso eficiente de la energía, reduciendo los costos de operación de los procesos; por uso de tecnología limpia, procurando el cuidado del medio ambiente.

BIBLIOGRAFIA

1. Holman J.G. "TRANSFERENCIA DE CALOR" 10ª Impresión, editorial Continental, 1999, México.
2. KERN. Donald Q. "PROCESOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR" Editorial Continental., 1999. México.
3. Welty James R. , Wicks Charles E., Wilson Robert E. "FUNDAMENTOS DE TRANSFERENCIA DE MOMENTO, CALOR Y MASA. " Editorial Limusa. 1998. México
4. Fisco agenda 2007, Correlacionada y tematizada; Compendio de leyes, reglamentos y otras disposiciones conexas sobre la materia
5. Farber, E.A. y Scorch E.L. "HEAT TRANSFER TO WATER BOILING UNDER PRESSURE" Transn. ASME Vol 70, pp369, 1948
6. Judson King C. "PROCESOS DE SEPARACIÓN" Editorial Repla., 1988, México.
7. Perry Robert H, "MANUAL DEL INGENIERO QUIMICO" Sexta Edición. Editorial Mc. Graw-Hill . 1992 México.
8. Foust, A.S. et al., Principles of Unit Operations, 2nd Edition, John Wiley, 1980, .
9. Crane, "FLUJO DE FLUIDOS, EN VALVULAS ACCESORIOS Y TUBERIAS" Editorial Mc. Graw-Hill . 1992 México.
10. McCabe, W.L., J.C. Smith, P. Harriott, Unit Operations of Chemical Engineering, 5th Ed., McGraw-Hill, 1993, .
11. Taborrek.J., Hewitt G. F. Afgan N. "HEAT EXCHANGERS" Mc Graw-Hill. Units States of America. 1983.
12. Loss prevention in the process industries. Volúmenes 1, 2 y 3. Frak P. Lees. Segunda edición. Ed. Butterworth-Heinemann, 1995.
13. Bejan Adrian "HEAT TRANSFER" editorial Jhon Wiley & SONS, Inc. 1993, Units States of America
14. Eckert E. R. G., Robert M. , Drake Jr. " ANALYSIS OF HEAT AND MASS TRANSFER" Mc Graw-Hill, 1972 Japón.

15. Hausen Helmut "HEAT TRANSFER IN COUNTER FLOW, PARALLEL FLOW AND CROSS FLOW" Mc Graw-Hill. 1976 Units States of America.
16. Henley J. Seader D. , "OPERACIONES DE SEPARACIÓN POR ETAPAS DE EQUILIBRIO EN INGENIERÍA QUÍMICA" .Editorial Repla. 1990., México.
17. Hawley Gessner. G "DICCIONARIO DE QUIMICA Y DE PRODUCTOS QUÍMICOS" Ed. Omega. 1975., España.
18. Incropera Frank P., David P. "FUNDAMENTOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR" 4ta Edición., Editorial Prentice may. 1999, México.
19. Kreith Frank.m, "PRINCIPIOS DE T RANSFERENCIA DE CALOR" Editorial Herro Hermanos., 1970. México.
20. Manrique José A., "TRANSFERENCIA DE CALOR" editorial Harla., 1981., México.
21. BENAVENTE, R.M.; GARCÍA, J.L.; PASTOR, M.; LUNA, L.; NOLASCO, J. 2000. Sistemas para la automatización de los invernaderos. Vida Rural Nº 118. 66-70.
22. NAVARRO, J.A. 1999. Pantallas térmicas para el control ambiental en invernadero. Plantflor. Cultivo y Comercio. Año 12. Nº 3. 20-24.
23. VALERA, D.L.; MOLINA, F.; PEÑA, A.A.; PÉREZ, J.; URRESTARAZU, M. 1999. Gestión del clima en invernaderos de Almería. Plantflor. Cultivo y Comercio. Año 12. Nº 3. 40-4
24. École Nationale Supérieure Des Industries Chimiques, Laboratoire Des Sciences Du Génie Chimique, Thèse "Contacteurs Gaz-Liquide Pour Pompes à Chaleur à Absorption Multi-Étagées" Jesús Torres Merino Annexe III pp. 3