



UNIVERSIDAD LAICA ELOY ALFARO DE MANABI

FACULTAD DE MECÁNICA NAVAL

**Trabajo de Graduación previo a la obtención del título de
INGENIERO MECÁNICO NAVAL**

Tema:

**“CALCULO Y DISEÑO DE UN EQUIPO DESALINIZADOR DE
AGUA POR EL METODO DE EVAPORACION”**

Autores:

YUJER GABRIEL MACIAS BOWEN

WALTER EMILIO FASCE VELEZ

Tutor:

ING. ANGEL FABIAN MOREIRA ROMERO

Manta – Ecuador

2013

APROBACIÓN DEL TUTOR

En mi calidad de Tutor del Trabajo de Grado sobre el tema “**Cálculo y diseño de un equipo desalinizador de agua por el método de evaporación**”, de los estudiantes: Yujer Gabriel Macías Bowen y Walter Emilio Fasce Vélez, alumnos de la Facultad de Mecánica Naval, considero que dicho Trabajo reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la evaluación del jurado examinador que el H. Consejo Directivo designe.

Manta, 5 de diciembre del 2013

El Tutor Ing. Ángel Fabián Moreira Romero

DECLARATORIA EXPRESA

“La responsabilidad por los hechos, ideas, y doctrinas expuestos en este Trabajo, nos corresponde exclusivamente; y, el patrimonio intelectual de la misma a la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí”

Los autores

Yujer Gabriel Macias Bowen

Walter Emilio Fasce Vélez

UNIVERSIDAD LAICA ELOY ALFARO DE MANABI
FALCULTAD DE MECÁNICA NAVAL

Los miembros del Tribunal Examinador aprueban (con mención honorífica y/o recomendación para su publicación) el trabajo de Graduación, sobre el tema: **“Cálculo y diseño de un equipo desalinizador de agua por el método de evaporación”**, de los estudiantes Yujer Gabriel Macías Bowen y Walter Emilio Fasce Vélez, alumnos de la Facultad de Mecánica Naval.

Manta, 5 de diciembre del 2013

Para constancia firman

Ing. Luis Challa Hasing
Decano

Ing. Ángel Moreira Romero
Director de Tesis

Ing. Pablo Emilio Macias
Miembro Principal

Ing. Luis Aragundi Cuadros
Miembro Principal

AGRADECIMIENTO

Agradecimiento de Yujer Macias.

A Dios por acompañarme todos los días de mi vida y se la luz que me guie siempre. A mis padres Yujer y Lucila por ser mis mejores amigos, aliados y como no decirlo mi ejemplo de vida, gracias por todo el apoyo en esta tesis y en mi carrera estudiantil. Andrea, gracias por tu infinita paciencia y tu inagotable apoyo, gracias por compartir mi vida y mis logros, esta tesis también es tuya.

Son muchas las personas que han formado parte de mi vida, a las que me encantaría agradecerles su amistad, consejos, apoyo, ánimo y compañía en los momentos buenos y malos. Algunas están aquí conmigo y otras en mis recuerdos y en mi corazón, sin importar en donde estén quiero darles las gracias por formar parte de mí, por todo lo que me han brindado y por todas las bendiciones. Para ellos:

Muchas gracias y que Dios los bendiga siempre.

Agradecimiento de Walter Fasce.

Abuelos

Padres

Hermanos

Familiares

DEDICATORIA

Dedicatoria de Yujer Macias.

A mis padres Yujer Macias y Lucila Bowen, a mis queridos hermanos, Xavier Macias y Genesis Macias, y exclusivamente a mi querida esposa Andrea Vilela y a mi amado hijo Yuger Manuel Macias Vilela.

Dedicatoria de Walter Fasce.

Abuelos

Padres

Hermanos

Familiares

RESUMEN

Se ha calculado y diseñado el equipo desalinizador de agua de mar utilizando el método de evaporación, con el único objetivo de que pueda ser utilizado en lugares donde resulta difícil y a costos muy elevados la obtención de agua dulce.

El método de evaporación ha resultado ser el método más antiguo del mundo y utilizado, debido a que se asemeja a uno de los procesos de cambio de fase del agua en la tierra, y por otra parte ha sido uno de los métodos más barato en cuanto a construcción, diseño y mantenimiento.

El cálculo se lo ha realizado partiendo de principios básicos de los fluidos y así como también la ayuda de tablas de donde se obtuvieron gran parte de las propiedades del agua que se necesitaban para realizar dicho calculo.

El diseño del equipo desalinizador de agua de mar es un diseño de poca complejidad y fácil de ser construido, consta de dos cámara una superior de condensación y otra cámara de calentamiento / evaporación, estos compartimientos estarán separados por placas deflectoras y por el filtro coalescente separador, todo esto en una sola caja compacta fabricada en materiales inoxidables y resistente a las exigencias del equipo.

En cuanto a las instalaciones exteriores, tanto como las tuberías y bombas se las ha logrado ubicar tratando de ocupar el más mínimo espacio y que lo único que se necesitaría para su funcionamiento seria cualquier fuente de calor que no valla más allá de una temperatura de 70 grados Celsius. Esperando que con la construcción del equipo desalinizador por futuros estudiantes se pueda lograr la meta de obtener agua dulce.

ABSTRACT

It has been calculated and designed the team seawater desalination using the evaporation method, with the sole aim of which can be used in places where it is difficult and very high costs to obtain fresh water. The evaporation method has proven to be the world's oldest method and used, because it resembles one of the phase change processes of water on earth, and on the other hand has been one of the cheapest methods as to construction, design and maintenance.

The calculation has been performed based on basic principles and fluids as well as the help of tables where we obtained most of the properties of water that is needed to perform the calculation. Equipment design seawater desalination is a less complex design and easy to be built , has two superior condensing chamber and another chamber of heating / evaporation, these chambers are separated by baffle plates and the separator coalescence filter , all in one compact box made of materials resistant stainless and equipment requirements .

For outdoor installations, as well as pipes and pumps they have been able to place trying to occupy the least space and all that is needed to operate any source of heat would not fence beyond a temperature of 70 degrees Celsius. Hoping that with the construction of the desalination unit for prospective students can achieve the goal of obtaining fresh water.

INDICE

	Página.
Portada.....	I
Aprobación del Tutor.....	II
Declaratoria Expresa.....	III
Aprobación del jurado examinador.....	IV
Agradecimiento.....	V
Dedicatoria.....	VI

CAPITULO I

ANTECEDENTES

1.- El agua a nivel mundial.....	16
1.1.- La escasez del agua.....	17
1.2.- El sector agrícola, mayor consumidor del agua.....	18
1.3.- Características del agua de los mares.....	20

CAPITULO II

SITUACION ACTUAL

2.- Problemática del agua en el Ecuador y en las comunas cerca de las costas.....	23
2.1.- Desalinización del agua.....	25

2.2.- Impacto de la desalación.....	30
-------------------------------------	----

SISTEMAS DE DESALINIZACIÓN

2.3.- Destilación de Multi-Etapas Flash (MEF).....	32
--	----

2.4.- Destilación de Múltiples Efecto (DME).....	34
--	----

CAPITULO III

PROPUESTA: CÁLCULO Y DISEÑO DE UN DESALINIZADOR DE AGUA POR EL METODO DE EVAPORACION

3.1.- Información General.....	37
--------------------------------	----

3.1.1.- Características de la Unidad.....	37
---	----

3.1.2.- Fuente Calorífica.....	38
--------------------------------	----

3.1.3.- Principio de funcionamiento.....	38
--	----

3.1.4.- Producción de agua.....	40
---------------------------------	----

3.2.- Diseño termo-hidraulico.....	41
------------------------------------	----

3.2.1.- Datos técnicos y estimados para el cálculo.....	41
---	----

3.2.2.- Cálculo del Condensador.....	42
--------------------------------------	----

3.2.2.1.- Cálculo del calor latente de evaporización.....	43
---	----

3.2.2.2.- Cálculo del coeficiente global de transferencia de calor (U).....	44
---	----

3.2.2.3.- Cálculo del coeficiente de convección.....	45
--	----

3.2.2.4.- Cálculo de diferencia de temperatura media logarítmica.....	46
---	----

3.2.2.5.- Cálculo del área de flujo por los tubos.....	46
3.2.2.6.- Cálculo del número de tubos del condensador (N°).....	46
3.2.2.7.- Cálculo del área total del condensador.....	46
3.2.2.8.- Cálculo de la longitud de los tubos según el número de pasos.....	46
3.2.3.- Cálculo del Calentador.....	47
3.2.3.1.- Calculo del coeficiente global de transferencia de calor (U).....	48
3.2.3.2.- Cálculo del coeficiente de convección.....	49
3.2.3.3.-Calculo de diferencia de temperatura media logarítmica.....	49
3.2.3.4.- Factor de corrección.....	50
3.2.3.5.- Cálculo del área de flujo por los tubos.....	50
3.2.3.6.- Cálculo del número de tubos del calentador (N°).....	50
3.2.3.7.- Cálculo del área total del calentador.....	50
3.2.3.8.- Cálculo de la longitud de los tubos según el número de pasos.....	51
3.2.4.- Perdidas de la bomba de agua salada.....	51
3.2.4.1.- Potencia necesaria de la bomba de agua salada.....	51
3.2.5.- Resultados finales.....	52
3.3.- Diseño mecánico.....	54
3.3.1.- Lista de requisitos.....	55
3.3.2.- Factores adicionales para la selección de los materiales.....	56
3.3.3.- Selección de material.....	57
3.4.- Calculo del diseño mecánico.....	57

3.4.1.- Selección de materiales para tubos y coraza.....	57
3.4.2.- Arreglo de los tubos.....	58
3.4.2.1.- Diámetro hidráulico.....	60
3.4.2.2.- Diámetro del haz tubular.....	60
3.4.2.3.- Espesor mínimo del espejo.....	62
3.4.2.4.- Calculo de la coraza de trabajo.....	62
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	64

INDICE DE FIGURAS

1. Advertencia a la escasez de agua.....	17
2. Escasez de agua desafío de siglo xx.....	18
3. Agua entubada de canal de irrigación en siria.....	20
4. El agua de mar.....	22
5. Los indígenas y conquistadores.....	23
6. El agua pura y con impurezas.....	26
7. Equipos compresores térmicos.....	27
8. Sistema de compresión a vapor.....	27
9. Sistema de compresión a vapor 2.....	28
10. Esquema de un colector solar.....	29
11. Procesos de osmosis inversa.....	30
12. Procesos de osmosis inversa 2.....	30
13. Procesos de evaporación súbita multi-etapa (MSF).....	33
14. Destilación súbita por efecto flash.....	34
15. Proceso de evaporación por multiefecto (MED).....	35
16. Arreglo de los tubos.....	59
17. Arreglo de los tubos 2.....	59

INDICE DE TABLAS

1. Impacto de la desalación.....	31
2. Cantidad de agua destilada según temperaturas.....	40
3. Resultados del condensador.....	52
4. Resultados del calentador.....	53
5. Resultados de la condensación.....	53
6. Resultados de la bomba de agua salada A/S.....	54
7. Propiedades mecánicas de acero inoxidable.....	58
8. Disposición de los tubos.....	60
9. Constantes para el diámetro del haz tubular.....	61

GLOSARIO.....	65
----------------------	-----------

ABREVIATURAS Y SIMBOLOS.....	67
-------------------------------------	-----------

BIBLIOGRAFIA.....	69
--------------------------	-----------

ANEXOS

Anexo 1. Propiedades del agua líquida.....	71
--	----

Anexo 2. Temp. de vaporización de compuestos inorgánicos y orgánicos.....	71
---	----

Anexo 3. Densidad y viscosidad del agua de mar.....	72
---	----

Anexo 4. Coeficiente individual de película "h".....	74
--	----

Anexo 5. Especificación técnica de tubos de diferentes medidas.....	74
---	----

Anexo 6. Especificación técnica de tubos de acero inoxidable.....	75
---	----

Anexo 7. Especificación mecánica de tubos.....	76
Anexo 8. Espesores mínimos de los espejos.....	77
Anexo 9. Diseño de la desalinizadora.....	78
Anexo 9. Plano de arreglo de tubos (condensador y calentador).....	79
Anexo 10. Plano de dimensiones del condensador.....	80
Anexo 11. Plano de dimensiones del calentador.....	81

INTRODUCCIÓN

La desalinización o desalación es el método o proceso de quitarle sal a algo, específicamente al agua salada, anteriormente fue descubierta por héroes bíblicos, desde Moisés en el mar rojo (Éxodo, capítulo 15, versículo 22-25), Tales de Mileto(624-547 a.C.), Aristóteles(384-322 a.C.), en fin grandes físicos, doctores conocedores de la materia, que vieron en el mar una fuente de riqueza no solo por los peces si no que ya se proyectaban hacia el futuro y quizás sabiendo que algún día el agua dulce se acabaría poco a poco y que no tendrían otra opción de utilizar el agua de los mares.¹

Desde décadas pasadas se conoce el principio de funcionamiento de equipos desalinizadores, pero su desarrollo no tuvo lugar hasta principios de la segunda guerra mundial. A esto se le suma el desarrollo comercial de otros equipos que a medida que pasaba el tiempo se iban construyendo y haciendo un sin número de pruebas. Como sabemos el agua salada está en el mar, que es el 97.5 % del agua del planeta, solo una cantidad del 1% es apta para el consumo humano.² El agua de consumo humano se la denomina agua potable y tratar de potabilizar el agua de mar sería una la solución para los escasos del agua potable en el mundo.

Si en los países desarrollados, la falta de agua supone un freno a su desarrollo, el panorama en los países del tercer mundo arroja cifras sobrecogedoras. En la actualidad el consumo de agua se duplica cada 20 años, es más de dos veces al aumento de la población mundial, por estas razones es de suma importancia estudiar la rentabilidad de los sistemas de desalación alimentados con energías renovables.³

1 Juan francisco Zúñiga Santana (Master en Ciencias; Investigador agregado de CUBAENERGIA)

2 News Soliclima; Fuente: Era solar enero-febrero 2006

3 Servicios de agua y drenaje de Monterrey I.P.D.

CAPITULO I

ANTECEDENTES

1.- El agua a nivel mundial.

El agua será el mayor conflicto geopolítico del siglo XXI, ya que se espera que en el año 2025, la demanda de este líquido indispensable para la vida humana será un 56% superior que el suministro normal ⁴, aproximadamente 48 países, más de 2800 millones de habitantes, se verán afectados por la escasez de agua.⁵ La creciente necesidad de lograr el equilibrio hidrológico a nivel mundial que asegure el abastecimiento suficiente de agua a la población se lograra coordinando la disponibilidad natural con las extracciones de recursos mediante el uso eficiente del agua.

La desproporción que existe entre la cantidad de agua que se receipta por escurrimiento y las extensiones territoriales que se llevan a cabo en el periodo corto de la temporada de lluvias hace que la disponibilidad del agua sea cada vez menos. Dándonos cuenta de esta situación, se enfrenta actualmente una terrible problemática de disponibilidad, desperdicio y contaminación del agua. Donde se encuentran las regiones húmedas, las represas tienen como función almacenar el agua para la generación de la energía eléctrica.

Podemos prevenir el mal uso del agua realizando las siguientes recomendaciones:

- Cierra las llaves mientras te enjabonas, te bañas, te afeitas o te cepillas los dientes.
- Utiliza solamente el agua estrictamente necesaria en el baño, en el lavado de trastes y en el lavado de ropa.
- Al usar la lavadora, usa el máximo de ropa permitido en cada carga.

⁴ Cristian Fers. Periodista científico y técnico superior en gestión ambiental

⁵ Min Wang y Dong Ying Wei (Beijing Normal University, China) <http://globalgeography.aag.org>

- Revisa periódicamente las paredes de la cisterna y el buen funcionamiento de la bomba.
- Reporta cualquier fuga que observes en la calle, vigila los mecanismos de depósito de sanitarios, tinacos y cisternas, reparando cualquier fuga.
- Vigila a tus hijos, para que en sus juegos no se bañen a chorro de agua. No desperdicies el agua, recuerda siempre la importancia del vital líquido.



Figura (1). Advertencia a escases de agua.

FUENTE: <http://noticias.masverdedigital.com/2012/advierten-sobre-las-consecuencias-de-crisis-del-agua-a-nivel-mundial/>

1.1.- La escasez del agua.

La escasez de agua ya está afectando a todos los continentes. Cerca de 1.200 millones de personas, viven en áreas de escasez física de agua, 500 millones se aproximan a esta situación y otros 1.600 millones, se enfrentan a situaciones de escasez económica de agua, donde los países no tienen de la infraestructura que se necesita para transportar el agua desde ríos y acuíferos.⁶ Actualmente, muchos países tienen menos agua de la que necesitan ya que los acuíferos, que son de tiempos prehistóricos, se están terminando con rapidez.

⁶ Informe sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo. Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos (WWAP), Marzo de 2012.

La escasez de agua constituye uno de los principales retos del siglo XXI al que se está enfrentando ya gran parte del mundo. En el siglo pasado, el uso y consumo de agua aumento a un ritmo dos veces superior al de la tasa de crecimiento de la población y, aunque no se puede hablar de escasez hídrica a nivel global, va en aumento el número de regiones con niveles muy graves de falta de agua la escasez de agua es un fenómeno no solo natural sino también causado por la acción del ser humano, pero la distribución de forma inadecuada, el desperdicio, la contaminación y el mal uso de aquella nos ha pasado factura. El agua de mar desalinizada es una fuente potencial, aunque el costo del proceso es diez veces mayor.



Figura (2). La escasez de agua constituye uno de los principales desafíos del siglo XX
FUENTE: <http://www.proyectopv.org/1-verdad/escasezagua.htm>

1.2.- El sector agrícola, mayor consumidor del agua.

El sector agrícola es el mayor consumidor de agua con el 65%, no sólo porque la superficie irrigada en el mundo ha tenido que quintuplicarse sino porque no se cuenta con un sistema de riego eficiente, razón principal que provoca que las pérdidas se tornen monumentales.⁷ Prevalciendo estas circunstancias partes del mundo han aprovechado al máximo el agua, lo que ha llevado a sobreexplotar los

⁷ Perspectivas del Medio Ambiente Mundial 2000. PNUMA. Ed. Mundi-Prensa. 2000.
Vivendi Environment. Annual Report 2000
<http://www.monografias.com/trabajos14/problemadelagua/problemadelagua.shtml#ixzz2gWbeaPch>

recursos hídricos tanto en la superficie como en el sub-suelo, creando un fuerte impacto ambiental.

La situación jurídica sobre el uso y conservación del recurso que se comparte casi siempre enfrentan una ausencia de reglamentación, aunque los países desarrollados han generado regulaciones y metodologías para una mejor gestión del recurso, no porque sean más precavidos, sino porque los problemas de contaminación de las aguas los comenzaron a enfrentar desde la época de los años 60 y 70, así tenemos que han logrado desarrollar alta tecnología y diversidad de metodologías para su conservación.⁸

La oferta de alimentos de muchos países en desarrollo depende del agua subterránea que se utiliza para irrigación, esto ha llevado a cabo el agotamiento sin ningún control de las capas acuíferas subterráneas representando una seria amenaza para la seguridad de los alimentos. En esos países, el agua subterránea se ha convertido en el sostén principal de las actividades agroalimentarias, sin embargo, ese valioso recurso no se está utilizando de manera sostenible. En los países en los que se depende del agua subterránea para la irrigación, El exceso de extracción de agua está provocando que los niveles subterráneos de agua dulce estén descendiendo a un ritmo muy alarmante.

Las consecuencias de no intentar solucionar ese problema son potencialmente catastróficas, especialmente para las poblaciones más pobres, que son las que más padecen la escasez del agua. Son tres los problemas principales que caracterizan a la utilización del agua subterránea:

⁸ Perspectivas del Medio Ambiente Mundial 2000. PNUMA. Ed. Mundi-Prensa. 2000.
Vivendi Environment. Annual Report 2000
<http://www.monografias.com/trabajos14/problemadelagua/problemadelagua.shtml#ixzz2gWbeaPch>

- El agotamiento debido a un exceso de extracción de este recurso.
- Las inundaciones.
- La salinización causada por un drenaje insuficiente.

Los usos del agua se determinan por la ubicación geográfica del lugar, la economía que tiene, las actividades que realizan las personas de la comunidad, cada vez se ve más como algunas acciones que realizamos en nuestra comunidad dañan no sólo la calidad del agua, si no también nos acerca más a la reducción extrema del recurso para poder abarcar las necesidades de todos los pobladores.



Figura (3). Agua entubada de un canal de irrigación en Siria
FUENTE: <http://www.fao.org/ag/esp/revista/0204sp2.htm>

1.3.- Características del agua de los mares.

La gran masa de agua formada por los océanos contiene el 97,5% del total del agua del mundo. El hombre por mucho tiempo se ha dedicado al estudio químico, biológico, físico y geológico del agua de los mares, el cual sea convertido en un asunto crítico porque llegara el momento en que la población se vuelva tan dependiente de los beneficios que nos puede brindar el océano, unos de estos a simple vista es el agua de mar, pero esta es salada contiene en su mayoría cloruro sódico (sal común) que limita su uso para beber o regar.

El agua marina tiene la particularidad de, contiene 73 de los 93 elementos químicos naturales, entre estos se citan el cloro, sulfatos, magnesio, potasio y

calcio, y como no los gases disueltos entre ellos el oxígeno que es vital para las especies y organismos del hábitad.

La salinidad promedio del agua de los mares esta entre un 33 y 37% y esto dependiendo las condiciones climáticas, por ejemplo las desembocaduras o el hielo fundido reducen la salinidad, mientras que en lugares de escasa precipitación y de evaporación elevada aumentan la salinidad; lo contrario para poder obtener agua de mar es necesario que el agua pase por procesos eléctricos, químicos o de cambio de fase, en los proceso de cambio de fase consiste en hacer pasar el agua por vapor y destilarla. Entre las propiedades que tiene el agua salada se cuenta con:

Alcalinidad: El agua de mar tiene un grado de acidez (pH) que fluctúa entre un valor de 7.6 y 8.4, lo que le confiere cierta propiedad alcalina.

Transmisión del sonido: En el mar la velocidad de propagación del sonido fluctúa entre 1400 y 1600 m/s, la que a su vez dependerá de la temperatura, la salinidad y la presión, siendo la primera el parámetro de mayor incidencia debido a las variaciones que presenta dentro de la columna de agua.

Índice de refracción: Este índice aumenta con la salinidad, mientras que con un aumento en la temperatura disminuye, por ejemplo, para una salinidad de 33 %, el índice de refracción fluctúa entre 4049 (a 0°C) y los 3851 (a 25°C).

Conductividad eléctrica: La capacidad de conducción de la electricidad a través del agua de mar se ve aumentada bajo la influencia de la presión ejercida por la columna de agua (presión hidrostática), Por ejemplo, para una salinidad de 35% y una temperatura de 15°C, el porcentaje de incremento (comparado con la presión atmosférica) experimentado por la conductividad varía entre 1.008 (a 100 metros de profundidad) y 7358 (a 1000 metros de profundidad).



**Figura (4).El agua de mar
FUENTE: los autores.**

CAPITULO II

SITUACION ACTUAL

2.- Problemática del agua en el Ecuador y en las comunas cerca de las costas.

El problema del agua en el Ecuador se empezó cuando llegaron los conquistadores españoles; la conquista representó la apropiación de las tierras y esto trajo como consecuencia la explotación de los indígenas en el trabajo. Los indígenas nativos de América realizaban muchas actividades a base de agua, es decir, que su vida económica, política, social y cultural giraba en torno al agua.

Pero los conquistadores nunca entendieron por qué los indios de América consideraban sagrada a la tierra, a los montes y al agua, estas cultura indígenas que confirmaban el respeto y cuidado del agua y de la naturaleza en sí, para los conquistadores fue expresión de idolatría a la que según ellos la desafiaban con Dios y fue castigada con tortura y muerte.



Figura (5) Los indígenas y los conquistadores

FUENTE: <http://es.paperblog.com/los-indigenas-y-los-conquistadores-1657364/>

Ecuador es un país con una de las mayores reservas hídricas en América del Sur, pero de igual manera el Ecuador tiene un problema grande con la distribución de este líquido. Este recurso natural necesita un proceso largo para que llegue potabilizada a las viviendas y la mayoría está distribuidos en manos de unos pocos sectores como: exportaciones agrícolas y grandes haciendas, y todo por la conveniencia política y el mal manejo del agua. También esto se da porque para

poder tener un realce en el mercado internacional, el gobierno envía más agua a cosechas que terminan exportadas. Sin embargo, los alimentos que se cosechan para el consumo nacional que están a cargo de los pequeños agricultores tienen poca agua para el riego, y están a la espera de las lluvias. Esta injusticia provoca muchas consecuencias en el medio ambiente como en la calidad de los productos y por supuesto a la vida de muchas personas.

No obstante, a pesar de ser Ecuador un país privilegiado en materia hídrica, este presenta un problema de distribución natural de la misma. En el caso de la vertiente del Océano Pacífico, esta solamente distribuye el 11,5% del caudal hídrico. Cabe remarcar, que la vertiente del Océano Pacífico cubre el 87% de la población del país y el 48% del territorio nacional, lo cual es una causa para el estrés hídrico que suele presentar el país, mientras que la vertiente Oriental distribuye el 88,5% del caudal hídrico del país, cubriendo solamente el 12,5% de la población y el 52% del territorio nacional.⁹

Por todos estos problemas con la distribución del agua, el Gobierno decidió crear la Secretaría Nacional del Agua (SENAGUA)¹⁰ en el 2008, con el fin de cuidar y manejar con igualdad la distribución de este elemento en el Ecuador. “Adicionalmente, se han invertido USD 66 millones para programas, tales como: Socio Agua y Saneamiento Rural y el programa de agua potable con subvención fiscal. Además, el Ejecutivo ha buscado fortalecer a la SENAGUA a través de la Ley de Recursos Hídricos, convirtiéndola en la Autoridad única del agua, encargada de la regulación, aprovechamiento y control del agua, permitiendo así establecer las tarifas para el recurso y sancionar infracciones concernientes a su aprovechamiento.¹¹

³.- **Secretaría Nacional del Agua, “Informe de rendición de cuentas 2008-2009”**

http://www.ecuadorlibre.com/index.php?option=com_content&view=article&id=13&Itemid=27

¹⁰ Decreto Ejecutivo 1088, 15 de Mayo del 2008. <http://www.agua.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2012/11/ACUERDO-2009-48-ESTATUTO.pdf>

¹¹.- Para un mayor análisis sobre la ley de recursos hídricos, uso y aprovechamiento del agua, se recomienda revisar los RL N°148 y 149. **Secretaría Nacional del Agua, “Informe de rendición de cuentas 2008-2009”**http://www.ecuadorlibre.com/index.php?option=com_content&view=article&id=13&Itemid=27

El agua potable para las comunas es uno de los retos más grandes para su conservación, especialmente en parroquias como por ejemplo Santa Marianita en Manta, San José en Montecristi, sin embargo las autoridades han hecho grandes esfuerzo por suministrar del líquido vital a las comunidades, pero por las grandes distancias y el recorrido por el montañoso territorio es casi imposible por los costos que esto implicaría. Por otra parte otros de los problemas son los residuos fecales, lo que rebasa la norma aceptable, y que a su vez impiden las perforaciones de pozos ya que temen la contaminación del agua dulce en los acuíferos subterráneos.

La gente de estas comunas perforan la tierra hasta encontrar pozos subterráneos con los cuales se abastecen de agua, pero cuando no los encuentran, tienen que contratar tanqueros con agua los cuales les resulta extremadamente caros por la distancia que recorren, y porque además no tienen la calidad deseada para su consumo.

2.1.- Desalinización del agua.

La desalación no es otra cosa si no la separación de la sal del agua, con el único fin de que sea apta para el consumo humano. Y al hablar de agua salada, ponemos nuestro pensamiento a dos de los recursos hídricos de donde se podría obtener agua salada, nos referimos a los océanos, y a las aguas subterráneas con alto índice de salinidad; estas últimas pueden proceder de acuíferos costeros en contacto directo con el mar y de acuíferos aislados del mismo.

Es necesario acotar que para la extracción de agua salada de los subterráneos se debe contar con unas maquinarias especiales, y a su vez de un costo elevado que a la larga no tendría un fin económico, se adquiere maquinarias especiales con el fin de no estropear el líquido a tratar, con el fin de que no se formen un sinnúmero de agentes ajenos al proceso.

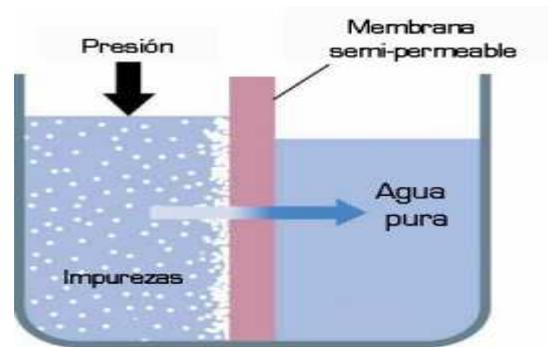


Figura (6).EL AGUA CON IMPUREZA Y AGUA PURA
 FUENTE: <http://www.codeso.com/EquipoDesalinización.html>

El proceso físico de desalación del agua se conoce desde décadas pasadas, donde el coste para realizar el proceso implicaba un gran uso de energía en este caso térmica, que lo hacía inviable y que se volvía un problema económico para quienes lo realizaban. Pero a medida que pasa el tiempo y la tecnología cambia se crean nuevos métodos para la extracción de la sal del agua (contenido en sales inferior a 500 ppm) a partir de agua de mar (contenido en sales del orden de 35.000 ppm) a un coste aún elevado pero que con el tiempo irá decreciendo; al hacer una comparación de lo que se gastaba anteriormente por ejemplo en la compra de un tanquero lleno de agua potable, la compra de agua embotellada, en fin gastos que con el equipo desalinizador ya no serán el problema del vivir diario de personas que obtiene el agua pagando por esta un valor, que en muchos casos es elevado, los procesos de desalación pueden dividirse en:

- **Procesos de destilación:** y se divide a su vez en:
 1. **Destilación térmica.-** Es el proceso donde se necesita de energía térmica obtenida de combustibles fósiles tales como el carbón, gas natural, petróleo, etc. Este proceso se lo puede lograr en los llamados termocompresores que adquieren el calor proveniente de las plantas termoeléctricas, esto tratándose de un proceso doble, si no se debería elaborar uno expresamente para dicho proceso, el vapor ingresa a baja presión dando lugar a un vapor de presión intermedia.



Figura (7). Equipos de compresores térmicos.
FUENTE: <http://www.codeso.com/EquipoDesalinización.html>

- **Por compresión de vapor (CV).**- Se logra utilizando un compresor adiabático en el cual ingresa vapor de una turbina y por medio de dos sectores de diferente presión se logra un cambio en las temperaturas lo que genera una temperatura apta para la condensación. En la desalación (CV) se evapora el agua salada, en un lado de la superficie del intercambiador de calor y se comprime lo suficiente para condensarse en el otro lado y pueda mantenerse el proceso de destilación de agua salvando las pérdidas de proceso y la elevación de temperatura de ebullición del agua salada respecto al agua pura. En la figura (8) podemos observar un compresor acoplado a un intercambiador de tubos verticales (VTE) de una tapa.

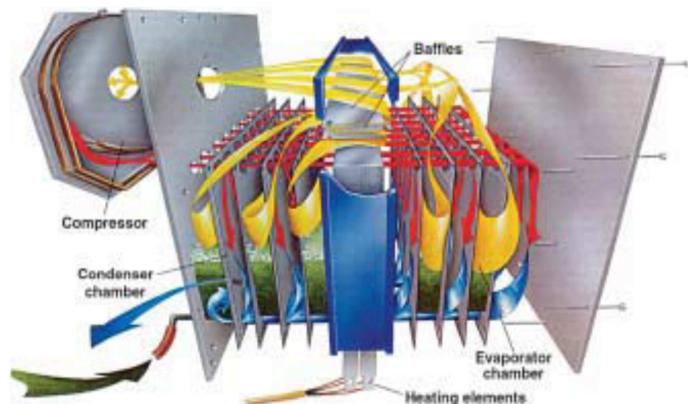


Figura (8) Sistema de Compresión de Vapor.
FUENTE: <http://www.codeso.com/EquiposDesalinizacion.html>

El diagrama de flujo de un sistema de compresión de vapor (fig. 7) comprende las siguientes secciones:

- Pre tratamiento.
- Intercambiadores de calor.
- Eliminación de gases no condensables.
- Evaporador: Cámara principal, Tubos de evaporación - condensación.
- Compresor.
- Pos tratamiento.

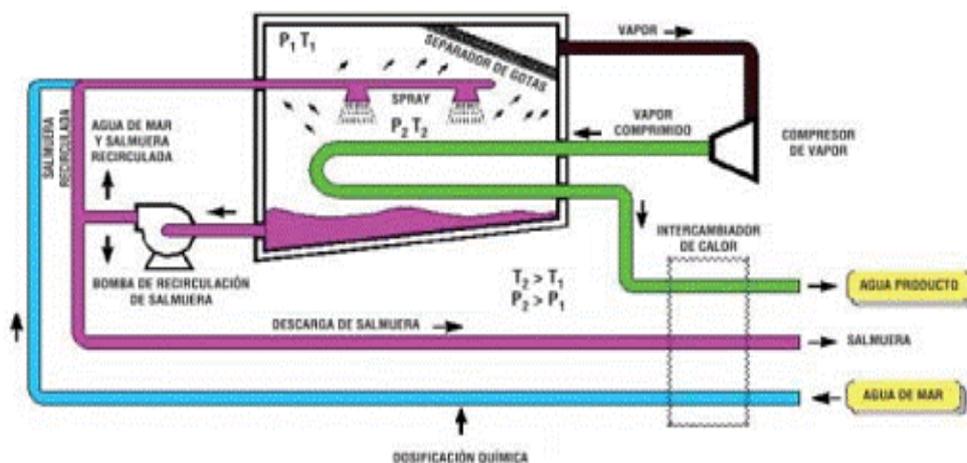


Figura (9) Sistema de Compresión de Vapor 2.

FUENTE: <http://www.emagister.com/curso-agua-desalacion-1-4/compresion-vapor-cv>

- **Destilación solar:** La destilación solar es un proceso en el cual utilizamos los rayos solares obteniendo diferentes temperaturas para lograr la separación de las sustancias de una mezcla líquida. La humanidad ha empleado la destilación para diversos fines, como para la producción de determinados tipos de alcohol, la obtención de agua pura o de otros compuestos químicos en estado puro. Como fuente de calor, la energía solar puede emplearse para destilar ya

sea concentrándola y alcanzando altas temperaturas o bien a temperaturas bajas.

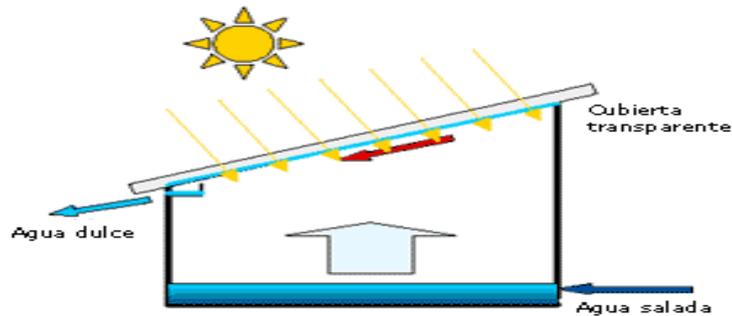


Figura (10) Esquema de un colector solar para destilación
Fuente: La desalación como alternativa al PHN.2001

➤ **Procesos de membrana:** son de gran difusión en la actualidad. Hay dos tipos básicos:

- **Ósmosis inversa:** Es el proceso que realiza la división de un elemento de otro en una solución por medio de fuerzas aplicadas a una membrana semipermeable, en el cual se emplea presión mecánica para contrarrestar la presión osmótica natural, de forma que el agua fluye desde la zona con mayor concentración de sales a la de menor concentración hasta obtener agua pura. El solvente salino se transportara en el sentido correcto hasta llegar al equilibrio, si se coloca en la solución de sal más concentrada un poco de presión, el flujo de solvente salino se detendrá cuando la presión ejercida sea igual a la presión osmótica aparente entre las dos soluciones salinas. Esta presión osmótica aparente es una medida de la diferencia de energía potencial entre ambas soluciones salinas. Si se aplica una presión mayor a la solución más concentrada, el solvente salino comenzará a fluir en el sentido inverso.

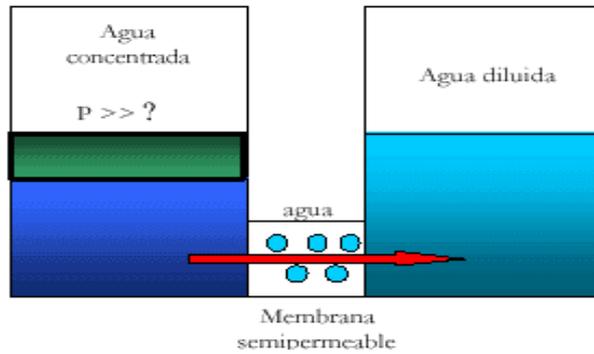


Figura (11) Proceso de ósmosis inversa
 Fuente: La desalación como alternativa al PHN.2001



Figura (12) Proceso de ósmosis inversa 2
 Fuente: el autor

2.2.- Impacto de la desalación.

El impacto que tienen los procesos de desalinización en el medio marino son casi similares y resulta principalmente de la evacuación de las aguas residuales, lo que ocasiona que las aguas resultante de la desalinización aumenten su contenido en sales que las aguas de origen, cambia su temperatura, difieren en pH y por ultimo contienen un alto contenido de alcalinidad y sustancia químicas utilizadas durante el proceso de depuración. Cabe recalcar que por mucho que los procesos sean tecnificados, se tendrá mayor o menor contenido de sales, se puede citar el caso de osmosis inversa de la que resulta un contenido de 2.3 a 7 ppm más de la del agua de origen. En todos estos procesos hay que adherir productos químicos tales como biosidas, anti-incrustantes y anti-espumantes, sin embargo muchos de los

componentes de los expulsados (ver tabla 1) tienen un impacto demostrado sobre el medio marino y, en algunos casos (en metales) no tanto por su concentración sino por la carga que representan.

Compuestos	Origen/Función	Impacto
Metales pesados: Cu, Fe, Ni, Cr, Zn	Corrosión	acumulación en el sistema, estrés a nivel molecular y celular
Fosfatos	anti-incrustantes	macro nutriente, eutrofización
BELGARD'2000 (Ac. Málico)	anti-incrustantes	desconocido
Cl ⁻	Antifouling	formación compuestos halogenados, carcinógenos y mutágenos
Ácidos grasos	tenso activos	membranas celulares
Sulfuro de sodio	anticorrosivo, captura O ₂	desconocido
Ácido sulfúrico	anti-incrustante	en grandes cantidades baja significativamente el pH del sistema
Residuos sólidos	limpieza de membranas	turbidez
Salmuera	concentrado de agua de mar	variable
Temperatura	Tratamiento	variable

Tabla (1) Impacto de la desalación.
Fuente: Información tomada del internet. www.empresadesalinizadors.com

SISTEMAS DE DESALINIZACIÓN

2.3.- Desalinización de Multi-Etapas Flash (MEF).

Es el proceso de destilación más utilizado en el mundo sobre todo en el Oriente Medio, es especialmente indicado para aguas con alta salinidad, temperatura y contaminación; su capacidad es mucho mayor que la de otras plantas destiladoras, pero tiene el inconveniente de que su consumo específico de energía es de los más grandes entre los procesos conocidos, lo que lo hace sólo permisible para naciones con energía barata.¹²

Este método se basa en el principio de que al reducir abruptamente la presión del agua de mar por debajo del valor de su presión de vapor de equilibrio, ocurre una evaporación súbita o una ebullición explosiva de la misma (y por lo tanto de carácter irreversible). Solo un pequeño porcentaje del agua se evapora, de forma que la producción de la planta se logra mediante la operación de sucesivas etapas que funcionan a presiones que se van reduciendo progresivamente.

Esto normalmente se logra introduciendo el agua de mar, previamente calentada a temperatura de ebullición con vapor de una fuente externa, en una cámara flash a través de un orificio de forma tal que se provoca una caída de presión suficiente para que sea menor a la de saturación a esa temperatura, evaporando parte del agua salada. Debido a la naturaleza violenta y turbulenta de la evaporación, el área de la superficie del agua expuesta aumenta beneficiándose así la producción de vapor. El vapor así producido pasa a través de mallas donde se despoja de las gotas de salmuera que arrastra. Este vapor es condensado luego sobre la superficie de tubos que alimentan el agua de mar a la planta. El agua de mar alimentada a la planta es precalentada también de esta forma con el calor cedido por el vapor durante la condensación del agua desalada producto.¹³

¹² Autor: Ing. ANTONIO ROS MORENO, (curso: El Agua, desalación (1/4))

¹³ Autor: Ing. ANTONIO ROS MORENO, (curso: El Agua, desalación (1/4))

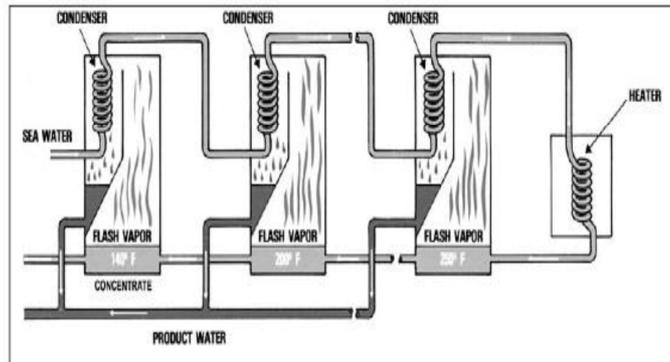


Figura (13) Proceso de Evaporación Múlti Etapa flash (MEF)
 FUENTE: <http://es.wikipedia.org/wiki/Evaporaci%C3%B3n>

El porcentaje de recuperación del agua producida en relación con la cantidad de agua de mar ingresada a la planta depende de la calidad del agua de mar de alimentación y de la temperatura "top" a la que opera la planta. En el proceso MEF la recuperación máxima es del orden del 12-20% (88-113°C).

Las plantas de MEF se pueden construir con configuraciones del tipo "once-through", o sea de un paso sin recirculación del agua bruta precalentada, o bien del tipo con recirculación de salmuera para reducir el aporte de agua bruta a desalar y el consumo de aditivos químicos. Estas plantas a su vez también pueden diseñarse con distintas configuraciones de tubos: tubos largos rectos o bancos de tubos cruzados. En la figura anterior se muestra un diagrama de flujo simplificado de la destilación *flash* multi-etapa. Este diagrama corresponde a una planta de MSF con configuración del tipo "once-through".

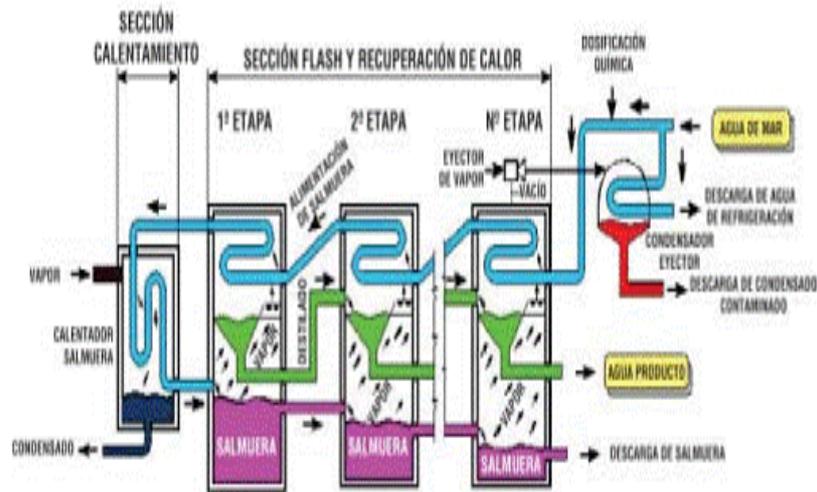


Figura (14) Destilación súbita por efecto flash
FUENTE: Destilación MD. Enero – Junio 2003

2.4.- Destilación de Múltiples Efecto (DME).

En el proceso DME el agua a desalinizar pasa a través de una serie de evaporadores puestos en serie. El vapor de una de las celdas se usa para evaporar el agua de la siguiente mientras que el aporte de energía primaria se hace sobre la primera de las celdas o etapas.¹⁴

Los principales componentes que comprende una instalación MED, son los siguientes:

- Pre tratamiento.
- Evaporador multi-efecto.
- Sistema de evacuación de gases no condensables.

La destilación de múltiple efecto (DME) utiliza el mismo principio que el proceso MEF. La diferencia principal entre el proceso DME y el MEF radica en la forma en que se lleva a cabo la evaporación. En las plantas de DME se utilizan varios evaporadores del tipo de película delgada (la evaporación se produce de forma

¹⁴ Autor: Ing. ANTONIO ROS MORENO, (curso: El Agua, desalación (1/4))

natural en una cara de los tubos de un intercambiador aprovechando el calor latente desprendido por la condensación del vapor en la otra cara del mismo), con los cuales se logran mejores coeficientes de transferencia de calor que los que se pueden obtener en las plantas de MEF donde se produce la evaporación súbita en forma directa. Las configuraciones disponibles para los evaporadores utilizados son: las de tubo vertical con película ascendente, las de tubo horizontal y vertical con película descendente y las de tipo plato. Los evaporadores del tipo plato están basados en un diseño de platos corrugados implementado por la firma Alfa Laval.¹⁵

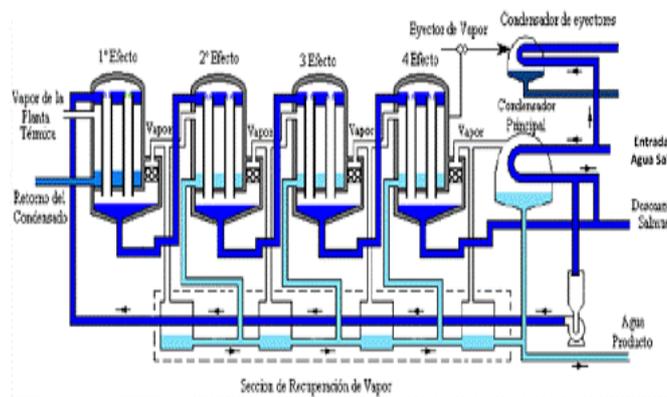


Figura (15). Proceso de Evaporación Multiefecto (MED)
FUENTE: <http://www.codeso.com/EquiposDesalinizacion.html>

La técnica de DME (múltiple efecto) consiste en evaporar en etapas sucesivas, así, la primera etapa es alimentada con vapor externo (70°-80°) y en el resto de las etapas se va utilizando el calor de condensación del vapor producido por la etapa anterior. De esta forma, se va elevando la temperatura del agua del mar desde unos 22°C, (2-3 grados por etapa), hasta la temperatura del vapor de alimentación. Simultáneamente, el condensado (agua desalada) va perdiendo temperatura hasta igualar, en la salida del proceso, a la del mar. Este proceso se realiza en un vacío constante en todas las etapas, aproximadamente 0.05 Kg/cm², equivalente a un punto de ebullición de 33°C.

¹⁵ **Autor:** Ing. ANTONIO ROS MORENO, (curso: El Agua, desalación (1/4))

El coste de capital es mayor que MEF, pero es más sencilla de operar y tiene un coste de operación menor. El sistema DME se ha utilizado fundamentalmente en plantas de tamaño medio y es muy aconsejable cuando se aprovechan los calores residuales procedentes del vapor de escape de las turbinas, motores diesel, turbinas de gas, etc., en las instalaciones de cogeneración en las que hay un considerable ahorro energético, y cuando no se pueden aplicar otros procesos.¹⁶

¹⁶ **Autor:** Ing. ANTONIO ROS MORENO, (curso: El Agua, desalación (1/4))

CAPITULO III

PROPUESTA: CÁLCULO Y DISEÑO DE UN DESALINIZADOR DE AGUA POR EL MÉTODO DE EVAPORACIÓN.

3.1.- Información General.

La desalinizadora de agua que se calculará y diseñará es para obtener agua destilada a partir del agua de mar. Esta se basa en el principio de evaporación a vacío y tubos sumergidos. El agua salada se vaporiza a baja temperatura debido al vacío existente dentro de la unidad y al aporte de energía térmica. Hemos tomado como referencia el manual de instrucciones de los generadores Aquamar de la empresa Géfeco Enterprise los cuales son muy usados en las embarcaciones de todo tipo para diseñar y calcular partiendo de datos reales y modificando a nuestra conveniencia algunos valores para realizar un cálculo seguro.

3.1.1.- Características de la Unidad.

El consumo de energía de la desalinizadora de agua será muy bajo, al utilizar como fuente calorífica cualquier tipo de energía residual. El proceso de la destilación tiene lugar en el interior de un recipiente rectangular, fabricado en acero inoxidable y con refuerzos internos del mismo material. Los refuerzos exteriores y el anclaje de la unidad son de acero al carbono. Los elementos necesarios para la condensación y calefacción estarán en el interior del recipiente, el cual está dividido en dos compartimientos: Uno superior (cámara de condensación) y otro inferior (cámara de calentamiento / evaporación). Estos compartimientos estarán separados por placas deflectoras y por el filtro coalescente separador.

Las tuberías de alimentación y demás accesorios, estarán situados en el exterior, ocupando el mínimo espacio, convirtiendo la desalinizadora de agua en un equipo compacto. El eyector de vacío/salmuera y la bomba de extracción de destilado irán

montados sobre la unidad, la bomba de agua salada se suministra por separado para su correcta instalación.

3.1.2.- Fuente Calorífica.

La desalinizadora de agua se deberá situar cerca de la fuente de agua caliente o medio calefactor que lo va alimentar, con el fin de reducir al máximo posible las pérdidas térmicas y caídas de presión. Cualquier tipo de energía calorífica con temperatura comprendida entre 60°C y 98°C se puede utilizar para el funcionamiento de la desalinizadora de agua.

3.1.3.- Principio de Operación.

El eyector del equipo funciona por el efecto Venturi. Cuando el agua, procedente de la bomba de agua salada, pasa a través de la tobera se produce un aumento de la velocidad debido a la reducción de la sección de paso, con la consecuente caída de presión. Mediante este efecto se puede alcanzar el vacío casi absoluto a la salida de la tobera.

El porta toberas, conectado a la desalinizadora de agua, actúa como cámara de vacío produciendo el vacío necesario dentro de equipo. Este vacío es el que permite bajar la temperatura de evaporación del agua entre 40°C y 55°C en el interior de la unidad. Cuanto mayor sea el vacío existente dentro de la unidad, menor será la temperatura de evaporación, y mayor será el rendimiento de la desalinizadora de agua.

El agua de calefacción, pasa por el interior de los tubos en "U" del calentador, situado en la parte inferior de la unidad, y eleva la temperatura del agua de alimentación hasta la temperatura de evaporación correspondiente al vacío existente dentro del equipo, aportando el calor latente de evaporación requerido para obtener la producción de destilado.

Esta baja temperatura de evaporación tiene dos efectos beneficiosos:

1. Reduce la formación de depósitos salinos sobre el calentador al disminuir la temperatura de la pared de los tubos.
2. La posibilidad de utilización de energía térmica a baja temperatura.

El nivel de agua en la zona de calefacción se mantiene constante por encima del haz tubular del calentador, por medio de un diafragma del nivel conectado al eyector aire/salmuera. El agua de condensación suministrada por el circuito de refrigeración de la instalación, atraviesa el interior de los tubos del condensador situado en la parte superior del equipo.

Debido a lo que el proceso de evaporación es intenso y rápido, el vapor producido puede ser húmedo y arrastrar micro gotas de agua salada que disminuirán la calidad de agua producida. Para evitarlo y obtener agua de elevada pureza los vapores producidos son forzados a pasar a través de las placas deflectoras donde al chocar las gotas y reducir su energía cinemática son conducidas de nuevo a la cámara de calentamiento.

Una vez que la mayor parte de las gotas han sido separadas, se efectúa una separación más profunda en el filtro coalescente separador metálico, fabricados con malla de acero inoxidable, donde las gotas de agua se coalescen y decantan a la parte baja, mientras que el vapor de agua asciende hacia la cámara de condensación.

Los vapores que alcanzan la zona superior de condensación se ponen en contacto con la pared fría de los tubos del haz del condensador cediendo la energía latente de condensación y, por lo tanto, condensándose. La bandeja situada por debajo del condensador, recoge las gotas de destilado que se van condensando. Mediante la bomba de extracción de destilado (bomba de agua dulce) se envía el agua producida a un reservorio de almacenamiento.

3.1.4.- Producción de agua.

El objetivo de este trabajo es calcular y diseñar un equipo desalinizador para que produzca 527.92 l/h. Para obtener esta producción de agua de acuerdo al manual de instrucciones Aquamar existes temperaturas específicas del agua salada y del agua de la fuente calorífica. Para producir esta cantidad de agua se requiere de acuerdo al manual 3,5 veces la cantidad de agua de mar lo que da 1874.72 l/h de la misma manera se obtendrán los caudales para la condensador y calentador.

AQUAMAR 12000
Agua dulce producida al día

80	14912	11549	12663	11835
75	14631	11113	12391	11430
70	14238	12670	11801	10705
65	13123	11560	10729	9649
60	11930	10503	9666	8644
	14	20	26	32

Temperatura agua de circulación caliente en °C

Temperatura agua del mar en °C

Tabla de valores según los siguientes datos

- Caudal agua caliente..... 34500 l/h
- Caudal agua salada..... 21000 l/h

Tabla (2). Cantidad de agua destilada según las temperaturas.
FUENTE: manual de instrucciones aquamar

3.2.- Diseño Termo-hidráulico.

3.2.1.- Datos técnicos y estimados para el cálculo.

1.-Producción $12670 \text{ l/día} = 527.92 \text{ l/h}$

2.- Cantidad de agua salada necesaria para el proceso 1847.7 l/h

(La cantidad de salmuera del calentador debe ser 3.5 veces de la cantidad de agua producida por hora)¹⁷

3.- Temperatura Máxima Salmuera para ebullición 45°C

4.- Diámetro de los tubos de condensador y calentador 0.025 m

5.- Pasos de los tubos del condensador y calentador 2

6.- Presión de agua salada 6 bar

Condensador

7.-Cuadal 21000 l/h

8.-Temperatura de entrada agua salada " A/S " 20°C

10.-Coeficiente de convección condensador h_2 ^(anexos 4) $16 \text{ Kw/m}^2\text{C}$

11.-Velocidad del agua de sal en los tubos ^(dato asumido por el autor) 0.74 m/seg

¹⁷ **AQUAMA**, Generadores de aguadulce, Manual de instrucción AQ-10/12,Gefico Enterprise

Calentador

12.- Caudal	35000 l/h
13.- Temperaturas del agua de Entrada	70°C
14.- Coeficiente de convección calentador h_2 ^(anexo 4)	16 KW/m ² °C
15.- Velocidad del agua de sal en los tubos ^(dato asumido por el autor)	1.24 m/seg

3.2.2.-Cálculo del Condensador.

$$\dot{m} \text{ sal} = \rho \text{ sal} \times Q \text{ sal}$$

$$Q \text{ sal} = 21000 \text{ l/h} = 0.00583 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\dot{m} \text{ sal} = 1028 \text{ kg/m}^3 \times 0.00583 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\dot{m} \text{ sal} = 6 \text{ Kg/seg}$$

$$Q \text{ product} = 527,92 \text{ l/h} = 1.4 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{seg}$$

$$\dot{m} \text{ product} = \rho \text{ product} \times Q \text{ product}$$

$$\dot{m} \text{ product} = 958 \text{ Kg/m}^3 \times (1.47 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{seg})$$

$$\dot{m} \text{ product} = 0.1408 \text{ Kg/seg}$$

Balance energético.

$$q \text{ cedido} = q \text{ ganado}$$

$$\dot{m} \text{ product} \times \lambda + \dot{m} \text{ product} \times C_p \text{ product} \times \Delta T \text{ product} = \dot{m} \text{ Sal} \times C_p \text{ Sal} \times \Delta T \text{ A/s}$$

3.2.2.1.-Cálculo del calor latente de evaporización.

$$\lambda = C1 \times (1 - Tr)^{c2+c3 \times c4 \times Tr \times Tr}$$

$$Tr = \text{Temperatura reducida } ^\circ K Tr = T/Tc$$

$$T = \text{Temperatura operación } ^\circ K$$

$$Tc = \text{Temperatura máxima o crítica } ^\circ K$$

Valores de la tabla 2-192 manual del Ing. Químico Perry, Capítulo II, pag 160 (Anexos)

$$C1 = 5.2053$$

$$C2 = 0.3199$$

$$C3 = -0.212$$

$$C4 = 0.25795$$

$$Tc = 647^\circ K$$

$$Tr = 316 \div 647 = 0.493^\circ K$$

$$\lambda = C1 \times (1 - Tr)^{c2+c3 \times c4 \times Tr \times Tr}$$

$$\lambda = 5.2053 \times (1 - 0.493)^{0.3199 + (-0.212) \times (0.493) + (0.25795) \times (0.493) \times (0.493)}$$

$$\lambda = 4.309 \div 18Kg = 0.2394 = 2394 \text{ Kj/Kg}$$

$$q \text{ cedido} = q \text{ ganado}$$

$$\dot{m} \text{ product} \times \lambda + \dot{m} \text{ product} \times C_p \text{ product} \times \Delta T \text{ product} \\ = \dot{m} \text{ Sal} \times C_p \text{ Sal} \times \Delta T \text{ A/S}$$

$$\left(0.1408 \text{ Kg/seg} \right) \left(2394 \text{ Kj/Kg} \right) + \left(0.1408 \text{ Kg/seg} \right) (4.18 \text{ kj})(45 - 40)^\circ C = q \text{ ganado}$$

$$q \text{ ganado} = 333.07 \text{ Kj/seg} + 2.94 \text{ kj}^2 \text{ } ^\circ C / \text{Kg}$$

$$q \text{ ganado} = \mathbf{336.01 \text{ Kw}}$$

$$q \text{ ganado} = \dot{m} \text{ sal} \times C_p \text{ sal} \times (T. \text{fria}_2 - T. \text{fria}_1)$$

$$T. A/S_{salida} = T. fria_1 + \frac{q \text{ ganado}}{\dot{m} \text{ sal} \times C_p \text{ sal}}$$

$$T. A/S_{salida} = 20^\circ\text{C} + \frac{336.01 \text{ Kw}}{6 \text{ Kg/seg} \times 4 \text{ kg/seg}}$$

$$T. A/S_{salida} = 34^\circ\text{C}$$

Con esta temperatura entran 1847.7 l/h de agua salada al calentador para seguir al proceso de ebullición.

3.2.2.2.-Cálculo del coeficiente global de transferencia de calor (U).¹⁸

$$\dot{m} \text{ sal} = 6 \text{ Kg/seg} \quad K = 0.675 \text{ W/m.}^\circ\text{C} = 6.75 \times \text{Kw/m.}^\circ\text{C}$$

$$\emptyset \text{ tubería} = 0.025\text{m} \quad h_2 = 16 \text{ W/m}^2.^\circ\text{C}$$

$$\mu \text{ sal} = 0.001 \text{ Kg/m. seg}$$

Nº de Reynolds.

$$Re = \frac{4Q. \rho. D}{\pi. D^2. \mu} = \frac{4Q. \rho}{\pi. D. \mu} = \frac{4. \dot{m} \text{ sal}}{\pi. D. \mu \text{ sal}}$$

$$Re = \frac{4 \times 6 \text{ Kg/seg}}{\pi \times 0.025\text{m} \times 0.001 \text{ kg/m. seg}}$$

$$Re = 305576 \text{ Flujo turbulento}$$

¹⁸ Valores obtenidos de Cálculo y diseño de una desaladora e integración en una central térmica de ciclo combinado pag. 4.

Nº de Prandtl.

$$Pr = \frac{C_p \times \mu}{K}$$

$$Pr = \frac{4\text{Kj/Kg} \times (0.001 \text{ Kg/m} \cdot \text{s})}{6,75 \times 10^{-4} \text{ Kw/m}^{\circ}\text{C}}$$

$$Pr = 5.92$$

Nº de Nusselt

$$Nu = 0.023 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.4}$$

$$Nu = 0.023 \times (305576)^{0.8} \times (5.92)^{0.4}$$

$$Nu = 1145$$

3.2.2.3.-Cálculo del coeficiente de convección.

$$h_1 = Nu \times \frac{K}{D}$$

$$h_1 = 1145 \times \frac{6.75 \times 10^{-4} \text{ Kw/m}^{\circ}\text{C}}{0.025\text{m}}$$

$$h_1 = 30 \text{ Kw/m}^{\circ}\text{C}$$

Coeficiente global.

$$U = \frac{1}{\left[\left(\frac{1}{h_1}\right) + \left(\frac{1}{h_2}\right)\right]}$$

$$U = \frac{1}{\left[\left(\frac{1}{30 \text{ Kw/m}^2 \cdot \text{°C}}\right) + \left(\frac{1}{16 \text{ Kw/m}^2 \cdot \text{°C}}\right)\right]}$$

$$U = 10.4 \text{ Kw/m}^2 \cdot \text{°C}$$

3.2.2.4.-Cálculo de diferencias de temperaturas medias logarítmicas.

$$\Delta T_1 = T_{\text{agua destilada (vapor) entrada}} - T_{\text{agua salada salida}} = 45^\circ\text{C} - 34^\circ\text{C} = 13^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_2 = T_{\text{agua destilada salida}} - T_{\text{agua salada entrada}} = 40^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C} = 20^\circ\text{C}$$

$$\Delta T. m. \ln = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1/\Delta T_2)} \Delta T. m. \ln = \frac{13^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}}{\ln(13^\circ\text{C}/20^\circ\text{C})}$$

$$\Delta T. m. \ln = 16.24^\circ\text{C}$$

El valor del factor de corrección para un condensador o una caldera $F = 1$ sin importar la configuración del intercambiador.

3.2.2.5.-Cálculos del área de flujo por tubos.

$$\dot{m}_{\text{sal}} = \rho_{\text{sal}} \times A \times V_{\text{sal}}$$

$$A = \frac{\dot{m}_{\text{sal}}}{\rho \times V} \quad A = \frac{6 \text{ Kg/seg}}{1028 \text{ Kg/m}^3 \times 0.74 \text{ m/seg}}$$

$$A = 0.0078 \text{ m}^2$$

3.2.2.6.-Cálculos del número de tubos del condensador. (Nº)

$$A = N^\circ \times \frac{\pi \times D^2}{4}$$

$$N^\circ = \frac{0.0078 \text{ m}^2 \times 4}{\pi \times (0.025 \text{ m})^2} = 15.89 = 16 \text{ tubos}$$

3.2.2.7.-Cálculos del área total de condensador.

$$AT = \frac{q_{\text{ganado}}}{U \times F \times \Delta T. m. \ln} = \frac{336.01 \text{ Kw}}{10.4 \text{ Kw/m}^2\text{C} \times (1) \times 16.24^\circ\text{C}} = 1.89 \text{ m}^2$$

3.2.2.8.-Cálculo de la longitud de los tubos según el número de pasos (L).

$$\text{Numero de pasos} = 2A_{\text{total}} = 2 \times N^{\circ} \times \pi \times D \times L$$

$$L = \frac{A_{\text{total}}}{2 \times N^{\circ} \times \pi \times D} = \frac{1.89\text{m}^2}{2 \times 16 \times \pi \times 0.025\text{m}} = 0.79\text{m}$$

3.2.3. – Cálculo del Calentador.

$$Q_{\text{fc}} = 34500 \text{ l/h} = 9.58 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{seg}$$

$$\dot{m}_{\text{fc}} = \rho_{\text{fc}} \times Q_{\text{fc}}$$

$$\dot{m}_{\text{fc}} = \left(975 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right) \times \left(9.58 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{seg} \right)$$

$$\dot{m}_{\text{fc}} = 9.34 \text{ Kg/seg}$$

$$Q_{\text{sal}} = 1847.72 \text{ l/h} = 5.13 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{seg}$$

$$\dot{m}_{\text{sal}} = \rho_{\text{sal}} \times Q_{\text{sal}}$$

$$\dot{m}_{\text{sal}} = \left(1028 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right) \times \left(5.13 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{seg} \right)$$

$$\dot{m}_{\text{sal}} = 0.53 \text{ Kg/seg}$$

Balance energético.

$$\dot{m}_{\text{fc}} \times C_{p\text{fc}} \times \Delta T_{\text{fc}} = \dot{m}_{\text{sal}} \times C_{p\text{sal}} \times \Delta T_{\text{sal}} + \dot{m}_{\text{product}} \times \lambda$$

$$\begin{aligned} & \left(9.34 \text{ Kg/seg} \right) \times \left(4.18 \text{ Kj/Kg. } ^\circ\text{C} \right) \times (70^\circ\text{C} - T_{c_2}) \\ & = \left(0.53 \text{ Kg/seg} \right) \times \left(4 \text{ Kj/Kg. } ^\circ\text{C} \right) \times (45^\circ\text{C} - 34^\circ\text{C}) + \left(0.1408 \text{ Kg/seg} \right) \\ & \quad \times \left(2394 \text{ Kj/Kg} \right) \end{aligned}$$

$$39.04 \text{ Kj/Kg} \times (70^\circ\text{C} - T_{fc_{salida}}) = 29.68 \text{ Kj/seg.} + 337 \text{ Kj/seg}$$

$$39.04 \text{ Kj/Kg} \times (70^\circ\text{C} - T_{fc_{salida}}) = 360.40 \text{ Kw}$$

$$T_{fc_{salida}} = 70^\circ\text{C} - \frac{360.40 \text{ Kw}}{39.04 \text{ Kw}} = 70^\circ\text{C} - 9.23$$

$$T_{fc_{salida}} = 60.77^\circ\text{C}$$

3.2.3.1.- Cálculo del coeficiente global de transferencia de calor (U).

$$\dot{m}_{fc} = 9.34 \text{ Kg/seg} \quad Pr = 2.38$$

$$\phi_{tuberia} = 0.025\text{m} \quad h_2 = 20 \text{ Kw/m}^2.^\circ\text{C}$$

$$\mu_{fc} = 0.000378 \text{ Kg/m. seg} \quad K = 0.666 \text{ W/m. } ^\circ\text{C}$$

Nº de Reynolds.

$$Re = \frac{4Q \cdot \rho \cdot D}{\pi \cdot D^2 \cdot \mu} = \frac{4Q \cdot \rho}{\pi \cdot D \cdot \mu} = \frac{4 \cdot \dot{m}}{\pi \cdot D \cdot \mu}$$

$$Re = \frac{4 \times 9.34 \text{ Kg/seg}}{\pi \times (0.025\text{m}) \times (0.000378 \text{ Kg/m. seg})}$$

$$Re = \frac{37.36 \text{ Kg/seg}}{0.0002969 \text{ Kj/m. seg}}$$

Re = 125833 fluido turbulento

Nº de Nusselt

$$Nu = 0.023 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.4}$$

$$Nu = 0.023 \times 125833^{0.8} \times 2.38^{0.4}$$

$$Nu = 391$$

3.2.3.2.- Cálculo del coeficiente de convección.

$$h_1 = Nu \times \frac{K}{D}$$

$$h_1 = 391 \times \frac{0.666 \text{ W/m. } ^\circ\text{C}}{0.025\text{m}}$$

$$h_1 = 10416 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

$$h_1 = 10.416 \text{ Kw/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

Coeficiente global.

$$U = \frac{1}{\left[\left(\frac{1}{h_1}\right) + \left(\frac{1}{h_2}\right)\right]}$$

$$U = \frac{1}{\left[\left(\frac{1}{10.416 \text{ Kw/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}\right) + \left(\frac{1}{16 \text{ Kw/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}\right)\right]}$$

$$U = 6.3 \text{ Kw/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

3.2.3.3.- Cálculo de diferencias de temperaturas medias logarítmicas.

$$\Delta T_1 = T \text{ fuente calorifica entrada} - T \text{ A/S salida(ebullición)} = 70^\circ\text{C} - 45^\circ\text{C} = 25^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_2 = T_{\text{fuente calorífica salida}} - T_{A/S \text{ entrada}} = 60.77^\circ\text{C} - 34^\circ\text{C} = 26.77^\circ\text{C}$$

$$\Delta T. m. \ln = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)} \Delta T. m. \ln = \frac{25^\circ\text{C} - 26.77^\circ\text{C}}{\ln(25^\circ\text{C} / 26.77^\circ\text{C})}$$

$$\Delta T. m. \ln = 25.87^\circ\text{C}$$

3.2.3.4.- Factor de corrección.

El valor del factor de corrección para un condensador o una caldera es $F = 1$ sin importar la configuración del intercambiador.

3.2.3.5.- Cálculo del área de flujo por tubo.

$$\dot{m} fc = \rho fc \times A \times V$$

$$A = \frac{\dot{m} fc}{\rho \times V} = \frac{9.34 \text{ Kg/seg}}{\left(975 \text{ Kg/m}^3\right) \times (1.22 \text{ m/seg})}$$

$$A = 0.0078 \text{ m}^2$$

3.2.3.6.-Cálculos del número de tubos del calentador. (Nº)

$$A = N^\circ \times \frac{\pi \times D^2}{4}$$

$$N^\circ = \frac{0.0078 \text{ m}^2 \times 4}{\pi \times (0.025 \text{ m})^2} = 15.89 = 16 \text{ tubos}$$

3.2.3.7.-Cálculos del área total de calentador.

$$A_T = \frac{q \text{ ganado}}{U \times F \times \Delta T. m. \ln} = \frac{360.40 \text{ Kw}}{6.3 \text{ Kw/m}^2\text{°C} \times (1) \times 25.87^\circ\text{C}} = 2.21 \text{ m}^2$$

3.2.3.8.-Cálculo de la longitud de los tubos según el número de pasos.

$$\text{Numero de pasos} = 2A \text{ total} = 2 \times N^{\circ} \times \pi \times D \times L$$

$$L = \frac{A \text{ total}}{2 \times N^{\circ} \times \pi \times D} = \frac{2.21\text{m}^2}{2 \times 16 \times \pi \times 0.025\text{m}} = \mathbf{0.88\text{m}}$$

3.2.4.- Perdidas de la bomba de agua salada.

$$P = \rho \times G \times H \qquad H = \frac{P}{\rho \times G}$$

$$P = \text{presión} = 3.5 \text{ bar}$$

$$\rho = \text{densidad agua salada} = 1028 \text{ kg/m}^3$$

$$G = \text{gravedad} = 9.8 \text{ m/s}^2$$

$$H = \text{altura de perdida} = ?$$

$$1\text{bar} = 100000 \text{ pascal}, \quad 1 \text{ pascal} = 1 \text{ kg/m.s}^2$$

$$H = \frac{600000 \text{ kg/m.s}^2}{1028 \text{ kg/m}^3 \times 9.8 \text{ m/s}^2} = \mathbf{59.55 \text{ m}}$$

3.2.4.1.- Potencia necesaria de la bomba de agua salada.

$$P_{\text{ot}} = \frac{Q \times \rho \times G \times H}{\eta}$$

$$Q = \text{caudal de la bomba} = 21 \text{ m}^3/\text{h} = 5.8 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\rho = \text{densidad agua salada} = 1028 \text{ kg/m}^3$$

$$G = \text{gravedad} = 9.8 \text{ m/s}^2$$

H = altura de perdida = 59.55 m

η = Eficiencia de la bomba = 85%

$$1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 / \text{s}^3 = 1 \text{ joule} / \text{s} = 1 \text{ watts}$$

$$P_{ot} = \frac{5.8 \times 10^{-3} \text{ m}^3 / \text{s} \times 1028 \text{ kg} / \text{m}^3 \times 9.8 \text{ m} / \text{s}^2 \times 59.55 \text{ m}}{0.85} =$$

$P_{ot} = 4093.6 \text{ watts}$

$P_{ot} = 4.1 \text{ kw}$

3.2.5.- Resultados finales.

DATOS	CONDENSADOR
Temp. entrada A/S	20°C
Temp. salida A/S	34°C
Pasos	2
Coefficiente de convección h1	30 $\text{kw} / \text{m} \text{ }^\circ\text{C}$
Coefficiente global de transferencia	10.4 $\text{kw} / \text{m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$
Diferencia de temperaturas In	16.24°C
Area de flujo por los tubos	0.0078 m^2
N° de tubos	16
Área total	1.98 m^2
Longitud	0.78 m^2

Tabla (3). Resultados del condensador.
FUENTE: Los autores.

DATOS	CALENTADOR
Temp. entradafc	70°C
Temp. salidafc	60.77°C
Pasos	2
Coeficiente de convección h1	10.146 $kw/m\text{ }^{\circ}C$
Coeficiente global de transferencia	6.3 $kw/m^2\text{ }^{\circ}C$
Diferencia de temperaturas In	25.87°C
Area de flujo por los tubos	0.0078m ²
N° de tubos	16
Área total	2.21m ²
Longitud	0.88m

Tabla (4). Resultados del calentador.
FUENTE: Los autores.

DATOS	CONDENSACIÓN
Temp. entrada agua salada	34°C
Temp. salida agua salada (ebullición)	45°C
Calor latente λ	2394 kJ/kg
Temp. producto	40°C

Tabla (5). Resultados del condensación.
FUENTE: Los autores.

DATOS	BOMBA A/S
Altura max. De perdida	59.55m
Potencia necesaria	4.1 kw

Tabla (6). Resultados de la bomba A/S.
FUENTE: El autor

3.3.- Diseño Mecánico.

El diseño mecánico es resultado de investigaciones sobre el límite de deformaciones de los materiales, es el valor de esfuerzo aplicado al material para deformarse permanentemente, adquiriendo propiedades diferentes a la de su estado inicial. El diseño mecánico de recipientes a presión, como el de la gran mayoría de los equipos para procesos industriales, se encuentran regidos por diferentes normas y códigos.

Para el caso de los intercambiadores de calor de tubo y coraza, el código más empleado es el ASME Boiler and Pressure Vessels Code (Código para Calderas y Recipientes a Presión de la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos).

La aplicación de dicho código, requiere de un amplio criterio para la interpretación correcta del mismo en el diseño. También existen las normas "TEMA" (Standard of Tubular Exchangers Manufactures Association) cuya finalidad es regular los criterios de diseño y fabricación de los intercambiadores de calor.

Los materiales que se elijan, deberán tener la suficiente resistencia para soportar la temperatura y presión de diseño, teniendo además que conducir a un diseño práctico. Una buena selección de materiales, asegurará bajos costos en todos los aspectos.

Existen varias etapas para efectuar una selección adecuada de materiales para la construcción de cambiador de calor, estas son:

3.3.1 Listas de requisitos.

3.3.2 Factores adicionales para selección de los materiales

3.3.3 Selección del material

3.3.1.- Lista de requisitos.

En esta lista, se deben incluir los materiales que satisfagan las condiciones de servicio, y para esto, es necesario que los materiales que se sugieran tengan las propiedades adecuadas, siendo más importantes las siguientes:

- 1) Propiedades Mecánicas.-** Las propiedades del material que más importancia tienen son:
 - Una alta resistencia a la tensión
 - Un punto de cedencia alto
 - Una mínima reducción de área
 - Un alto porcentaje de alargamiento

- 2) Propiedades Físicas.-** Siendo más importante el coeficiente de dilatación térmico del material, ya que este limitará el valor del esfuerzo a la tensión y en consecuencia afectará el diseño del cambiador.

- 3) Facilidad para su Fabricación.-** De acuerdo a los medios disponibles y elegidos para la fabricación del equipo, los materiales deberán contar con las siguientes características:
 - **Maquinabilidad.-** Se hace necesario maquinar ciertas partes del cambiador (como son: las bridas, espejos, tapas Planas, etc.), para darle la forma o acabado a las superficies para asentamiento del empaque, juntas de ensamble, etc. Para ello, un material difícil de maquinar es más costoso en su fabricación, ya que requiere de procedimientos y herramientas costosas.

- **Soldabilidad.-** El material que se ha de utilizar para la fabricación del cambiador, deberá tener buenas propiedades de soldabilidad, ya que gran parte de sus elementos son de construcción soldable.
- **Facilidad de ser formado.-** El material será trabajado mecánicamente para darle la forma deseada, como el rolado de las placas para la fabricación de elementos cilíndricos, formado de tapas, etc.
- **Compatibilidad del Equipo Existente.-** Se deberá utilizar por conveniencia materiales de una misma clase, para evitar el tener gran cantidad de materiales de reposición en el almacén.

3.3.2.- Factores adicionales para la selección de los materiales.

En esta etapa se tomará en cuenta la vida útil de la planta donde serán integrados los equipos (Cambiadores de Calor) que se están diseñando, para ello, se fijará la atención en los siguientes puntos:

- 1) **Vida estimativa de la planta.-** Generalmente, una planta se proyecta para un determinado tiempo de vida útil, partiendo de esta base, se puede formar un criterio sobre la clase de los posibles materiales a utilizar.
- 2) **Duración estimada del material.-** Para conocer la vida estimada del material, será necesario auxiliarnos de literatura existente sobre el comportamiento del material en situaciones similares, así como reportes de las experiencias de personas que han operado y conocen los problemas que frecuentemente se presentan en plantas idénticas.
- 3) **Costo del material y fabricación.-** Frecuentemente a un alto costo de material le corresponde un alto costo de fabricación.

3.3.3 Selección del material.

La decisión final que se tomará para la selección del material, se hará de acuerdo a lo siguiente:

- 1) **Material más adecuado.**- Este será aquél que cumpla con el mayor porcentaje de requisitos técnicos, ya que de estos depende el buen funcionamiento del equipo.
- 2) **Requisitos económicos.**- El material que implique menores gastos como son: iniciales, de operación, de mantenimiento y un mayor reembolso de inversión, sin que por este concepto se tenga que sacrificar el punto anterior.

3.4. Cálculos del diseño mecánico.

3.4.1. Selección del material para tubos y coraza.

Tomando en cuenta las recomendaciones anteriores para hacer una buena elección de materiales y por su comercialidad en el medio hemos decidido elegir el acero inoxidable 1.4401 mejor conocido como AISI 316. Este acero inoxidable contiene entre un 17-18% de cromo y un 8-11% de níquel. La aleación 316 es un acero inoxidable austenítico de uso general con una estructura cúbica de caras centradas. Es esencialmente no magnético en estado recocido y sólo puede endurecerse en frío. Se añade molibdeno para aumentar la resistencia a la corrosión especialmente en entornos que contienen cloruros.¹⁹

¹⁹ <http://www.goodfellow.com/S/Acero-Inoxidable-AISI-316-Tubo.html>

Tabla 2.1 Propiedades mecánicas especificadas para los aceros inoxidable usuales según EN 10088-2

	Grado	Producto ¹⁾	Espesor máximo (mm)	Mínima resistencia ²⁾ correspondiente al 0.2% (N/mm ²)	Resistencia última a tracción (N/mm ²)	Alargamiento de rotura (%)
Aceros inoxidables austeníticos básicos de cromo y níquel	1.4301	C	8	230	540 – 750	45 ⁽³⁾
		H	13,5	210	520 – 720	45 ⁽³⁾
		P	75	210	520 – 720	45
Aceros inoxidables austeníticos de molibdeno, cromo y níquel	1.4307	C	8	220	520 – 700	45
		H	13,5	200	520 – 700	45
		P	75	200	500 – 700	45
Aceros inoxidables austeníticos de molibdeno, cromo y níquel	1.4401	C	8	240	530 – 680	40
		H	13,5	220	530 – 680	40
		P	75	220	520 – 670	45
Aceros inoxidables austeníticos de molibdeno, cromo y níquel	1.4404	C	8	240	530 – 680	40
		H	13,5	220	530 – 680	40
		P	75	220	520 – 670	45

Tabla (7). Propiedades mecánicas de acero inoxidable
FUENTE: propiedades de aceros inoxidable pag 6

El diseño mecánico será el mismo tanto para en condensador como para en el calentador.

3.4.2.- Arreglo de los tubos.

Los tubos generalmente se arreglan en forma triangular o rectangular.

1. El **arreglo triangular** permite albergar un mayor número de tubos dentro del casco y da mayores coeficientes de película, se emplea con fluidos limpios y cuando la limpieza se realiza con medios químicos.
2. El **arreglo cuadrado** se emplea cuando se quiere albergar un menor número de tubos y cuando la limpieza debe hacerse con medios mecánicos, se emplea con fluidos turbulento con tendencia a formar incrustaciones, este arreglo produce bajas caídas de presión en el lado del casco.

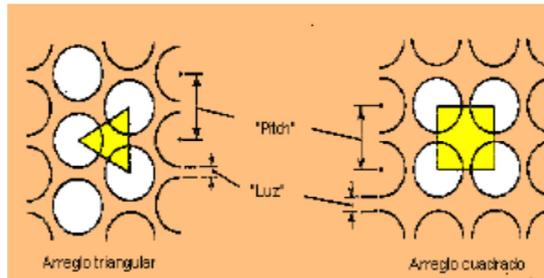


Figura (16). Arreglo de tubos
FUENTE: Operaciones unitarias "Intercambiadores de Calor de Tubo y Carcasa
Profesor: Luis Vega Alarcón
2012

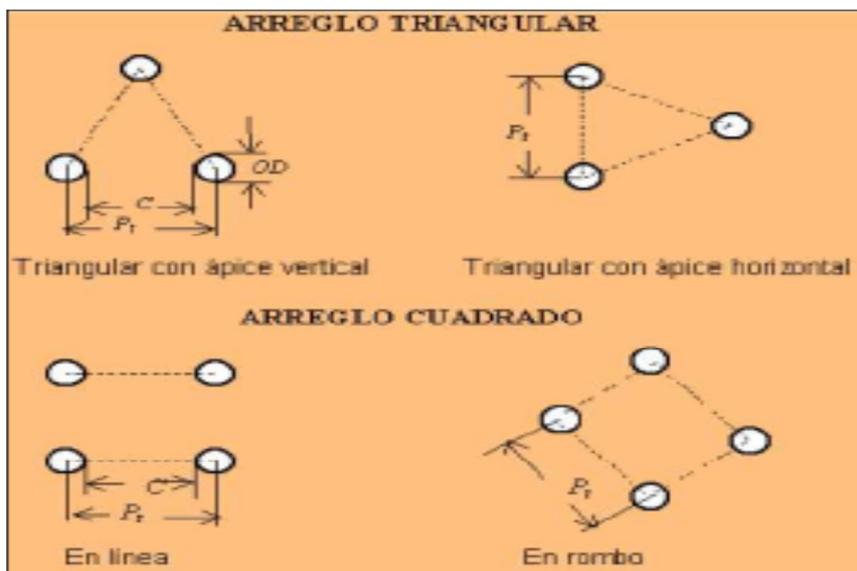


Figura (17). Arreglo de tubos 2
FUENTE: Operaciones unitarias "Intercambiadores de Calor de Tubo y Carcasa
Profesor: Luis Vega Alarcón
2012

La distancia recomendada entre centros de tubos P_t (Pitch) es de 1,25 veces el diámetro exterior del tubo y la mínima distancia entre tubos C (luz) debe ser 0,25 pulgadas (6,4 mm).

La relación entre P_t y C es:

$$P_t - OD = C$$

Los valores de P_t recomendados son:

ARREGLO	OD del tubo: pulg	P_t : pulg
Triangular	$\frac{3}{4}$	15/16
	1	1 $\frac{1}{4}$
Cuadrangular	$\frac{3}{4}$	1
	1	1 $\frac{1}{4}$

Tabla (8). Arreglo de tubos
FUENTE: Operaciones unitarias "Intercambiadores de Calor
De Tubo y Carcasa Profesor: Luis Vega Alarcón
2012

Comparando los datos y el uso de los intercambiadores decidimos emplear el arreglo cuadrado.

$$P_t = 254\text{mm} \times 1.25 \text{ veces} = 317.5\text{mm}$$

$$C = 317.5\text{mm} - 254\text{mm} = 63.5\text{mm}$$

3.4.2.1.- Diámetro hidráulico.

$$D_h = \frac{4 \times \left(P_t^2 - \frac{\pi \times OD^2}{4} \right)}{\pi \times D_o}$$

$$D_h = \frac{4 \times \left((31.75\text{mm})^2 - \frac{\pi \times (25.4\text{mm})^2}{4} \right)}{\pi \times 25.4\text{mm}}$$

$$D_h = 25.13 \text{ mm}$$

3.4.2.2.- Diámetro del haz de tubos.

El diámetro del haz de tubos va relacionado del número de tubos y de su arreglo, el número de tubos fue calculado anteriormente y dio como resultado 16 tubos en el condensador a dos pasos y de igual manera en el calentador, es decir que el diámetro va hacer igual para los dos con el arreglo cuadrado de igual forma, un estimado del diámetro del haz se puede conocer con la siguiente formula empírica basada en la distribución estándar de los tubos:

$$D_h = D_o \times \left(\frac{N_t}{K_1} \right)^{\frac{1}{\alpha}}$$

D_h = diametro del haz

D_o = diametro exterior del tubo ^(Anexo 5,6,7)

N_t = Número de tubos

K y α = constantes dadas en la siguiente tabla

Constantes para D_b

Arreglo triangular, $P_t = 1,25$ OD					
No. De pasos	1	2	4	6	8
K_1	0,319	0,249	0,175	0,0743	0,0365
α	2,142	2,207	2,285	2,499	2,675

Arreglo cuadrado, $P_t = 1,25$ OD					
No. De pasos	1	2	4	6	8
K_1	0,215	0,156	0,158	0,0402	0,0331
α	2,207	2,291	2,263	2,617	2,643

Tabla (9). Constantes para diámetro del haz
FUENTE: Operaciones unitarias "Intercambiadores de Calor de Tubo y Carcasa *Profesor: Luis Vega Alarcón* 2012

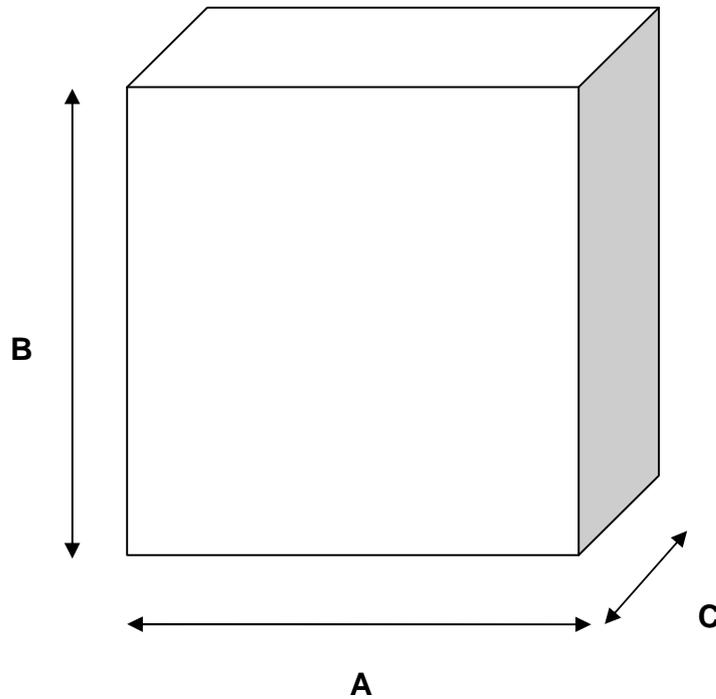
$$D_h = 33.4\text{mm} \times \left(\frac{16}{0.156}\right)^{\frac{1}{2.291}} = 251.50 \text{ mm}$$

3.4.2.3.- Espesor mínimo del espejo.

Rigiéndonos a las normas establecidas TEMA el espesor mínimo para tubos de 25.4mm es de 6.782mm según la tabla RCB – 7.22M ^(anexo 8)

3.4.2.4.- Cálculo de la coraza de trabajo.

Con los cálculos obtenidos podemos determinar las dimensiones del recipiente de destilación acomodándose a los haces tubulares.



Dimensiones:

- $A = 1m$
- $B = 1.1m$
- $C = 0.5m$

Volumen:

$$V = A \times B \times C = 1m \times 1.1m \times 0.5m = 0.55m^3$$

Area:

$$A = 2(AB + AC + BC)A = 2((1 \times 1.1) + (1 \times 0.5) + (1.1 \times 0.5))$$

$$A = 4.3m^2$$

Diagonal:

$$D = \sqrt{A^2 + B^2 + C^2}D = \sqrt{1^2 + 1.1^2 + 0.5^2} = 1.57m$$

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se concluye:

- Las normas “TEMA” y “ASME” son muy importantes para la construcción de intercambiadores de calor.
- La unidad que se diseñó consta de dos haces tubulares con poca diferencia en su longitud, uno realiza el trabajo de calentador y el otro de condensador es decir son dos intercambiadores de calor que trabajan en conjunto.
- En el diseño termo hidráulico se determinaron en número de tubos, la longitud de los tubos, potencia necesaria de la bomba.
- En el diseño mecánico se determinan los materiales a utilizar el arreglo de los tubos, espesor mínimo de la carcasa.

Se recomienda:

- Se recomienda a las personas no desperdiciar el agua, usar lo necesario, cerrar bien las llaves, reparar las fugas de agua, cuidarla porque es un recurso natural limitado.
- Para realizar los diseños se necesita tener algo de conocimiento de las normas que rigen los intercambiadores de calor, TEMA y ASME.
- Fabricar el equipo para tener una opción de agua no salada para el futuro.

GLOSARIO

ACERO DE CONSTRUCCION.- Constituye una proporción importante de los aceros producidos en las plantas siderúrgicas. Con esa denominación se incluye a aquellos aceros en los que su propiedad fundamental es la resistencia a distintas sollicitaciones (fuerzas tanto estáticas como dinámicas).

ACERO INOXIDABLE.- Es un acero de elevada pureza y resistente a la corrosión, dado que el cromo, u otros metales que contiene, posee gran afinidad por el oxígeno y reacciona con él formando una capa pasivadora, evitando así la corrosión del hierro (los metales puramente inoxidable, que no reaccionan con oxígeno son oro y platino, y de menor pureza se llaman resistentes a la corrosión, como los que contienen fósforo).

ACERO AL CARBONO.- Es la aleación de hierro con un porcentaje de carbono mayor a lo que se puede alear con el hierro

ACUOSA.- que tiene mucha agua.

ANION.- Es un ion (o ión) con carga eléctrica negativa.

AUSTENITA.- (Austentico), La austenita es una forma de ordenamiento distinta de los átomos de hierro y carbono. Esta es la forma estable del hierro puro a temperaturas que oscilan entre los 900 a 1400 °C. Está formado por una disolución sólida del carbono de hierro, lo que supone un porcentaje máximo de C del 2,11%. Es dúctil, blanda y tenaz.

BAR.- Es unidad de presión equivalente a un millón de barias, aproximadamente igual a una atmósfera (1 atm).

CAVITACION.- Aspiraciones en vacío es un efecto hidrodinámico que se produce cuando el agua o cualquier otro fluido en estado líquido pasa a gran velocidad por una arista afilada, produciendo una descompresión del fluido debido a la conservación de la constante de Bernoulli.

COALESCENCIA.-Es la posibilidad de dos o más materiales de unirse en un único cuerpo.

DESALACIÓN.- Es un proceso mediante el cual se elimina la sal del agua de mar o salobre

EFEECTO VENTURI.- Consiste en que un fluido en movimiento dentro de un conducto cerrado disminuye su presión al aumentar la velocidad después de pasar por una zona de sección menor.

ENERGÍA TÉRMICA.-La energía térmica o calorífica es la parte de energía interna de un sistema termodinámico en equilibrio que es proporcional a su temperatura absoluta y se transfiere en forma de calor en procesos termodinámicos.

ELECTRODIALISIS.- Es una tecnología que permite, bajo la influencia de un campo eléctrico continuo, extraer sustancias ionizadas disueltas en una disolución acuosa a través de membranas selectivas de intercambio iónico.

EVAPORACIÓN.- Es un proceso físico que consiste en el paso lento y gradual de un estado líquido hacia un estado gaseoso, tras haber adquirido suficiente energía para vencer la tensión superficial

GOLPE DE ARIETE.- Se denomina golpe de ariete al choque violento que se produce sobre las paredes de un conducto forzado, cuando el movimiento líquido es modificado bruscamente

HAZ TUBULAR.-Conjunto de tubos que forman la superficie de convección de una caldera.

ION.- especie química, ya sea un átomo o una molécula, cargada eléctricamente.

pH.- (potencial de hidrogeniones) es una medida de acidez o alcalinidad de una disolución.

SALMUERA.- Agua con alta concentración de sal.

ABREVIATURAS Y SIMBOLOS

l/h = litros por hora

m^3/seg = metros cúbicos por segundos

ρ = densidad

m^3 = metros cúbicos

Kg = kilogramos

\dot{m} = flujo másico

Q = caudal

q = calor

Cp = calor específico

C_q = coeficiente de capacidad de una bomba centrífuga

ΔT = diferencia de temperatura

T = temperatura

$^{\circ}C$ = grados Celsius

$^{\circ}K$ = grados kelvin

λ = calor latente

Tr = temperatura reducida

Tc = temperatura máxima o crítica

Product = producto

C1, C2, C3, C4 = Valores Los calores de vaporización de compuestos inorgánicos y orgánicos de la tabla 2-193 del manual del Ing. químico Perry sexta edición, capítulo II, página # 160.

\emptyset = diámetro

A/S = agua salada

μ = viscosidad Dinámica

$h_1, h_2 =$ coeficiente de transferencia de calor por convección

Mw = megavattios

Kw = kilowatt

ω = watts

K = coeficiente de convección por conducción

Ppm = partes por millón

BIBLIOGRAFÍA

1. **WHITE, Frank m.** (2000) fluid mechanics 4th edition Chapter 11, Turbomachinery. Boston Burr Ridge, IL Dubuque, IA Madison, WI New York San Francisco St. Louis Bangkok Bogotá Caracas Lisbon London Madrid Mexico City Milan New Delhi Seoul Singapore Sydney Taipei Toronto. EDITORIAL:McGraw-Hill Series in Mechanical Engineering
2. **PERRY, Jhon h.** (2001) Manual del ingeniero químico. Capítulo 2, tablas de temperaturas de vaporización de compuestos inorgánicos y orgánicos.
3. **ELEAZAR, Pablo Jorge.** (2009) “La Desalación de agua de mar con agua caliente utilizando procesos térmicos”. UNAM. México.
4. **Enciclopedia VISUAL Salvat.** (1981) Tomo 4 La Tierra. Pag. 62 “El mar y el agua marina”
5. **ZÚÑIGA SANTANA, Juan Francisco:** “La desalinización: una opción a tener en cuenta”. Cuba energía.
6. **José Roldan Viloría:** (1997) “Neumática, hidráulica, electricidad aplicada” Quinta edición, Editorial: Paraninfo, Bilbao Páginas: 241
7. **CARMOS cia. Ltda, Asesores & Consultores,** (2005) “ManualdeVálvulas compresores y bombas” Curso Técnico, Instructor: Alvaro Aguinaga BarraganPh.D MSC. ING., Páginas: 139
8. **RIBEIRO DA LUZ, Antonio Máximo; ALVAREZ, Beatriz Alvarenga** (2001) “Física General con experimentos sencillos” Oxford University PressPáginas: 1219
9. **T.E.M.A, NINTH EDITION, TUBULAR EXCHANGER MANUFACTURERS ASSOCIATION, INC.,** (2007) 25 North Broadway, Tarrytown, New York 10591Richard C. Byrne, Secretary, www.tema.org

10. **AQUAMAR**, (2005) Generadores de aguadulce, Manual de instrucción AQ-10/12 “Géfico Enterprise” pag, 120

ANEXOS

Anexo 1. Propiedades del agua líquida.

Tabla 4.5: Propiedades del agua líquida a presión atmosférica

T (°C)	ρ (kg/m ³)	C_p (kJ/kg·K)	$\mu \cdot 10^6$ (N·s/m ²)	$\nu \cdot 10^6$ (m ² /s)	$k \cdot 10^3$ (W/m·K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)	$\beta \cdot 10^3$ (1/K)	Pr
0.001	1005	4.213	1766	1.757	567.2	0.1339	-0.08021	13.12
5	1004	4.201	1506	1.500	574.8	0.1363	0.01135	11.00
10	1003	4.191	1300	1.297	583.0	0.1387	0.08744	9.348
15	1001	4.184	1135	1.134	591.4	0.1412	0.1523	8.033
20	999.5	4.180	1001	1.001	599.8	0.1436	0.209	6.975
25	997.9	4.176	890.1	0.8920	608.0	0.1459	0.2594	6.114
30	996.2	4.175	797.6	0.8007	616.0	0.1481	0.3051	5.406
35	994.3	4.174	719.6	0.7238	623.6	0.1503	0.347	4.817
40	992.4	4.174	653.3	0.6583	630.7	0.1523	0.3859	4.323
45	990.3	4.175	596.3	0.6022	637.4	0.1542	0.4225	3.906
50	988.1	4.177	547.1	0.5537	643.6	0.1559	0.4572	3.551
55	985.7	4.179	504.2	0.5115	649.3	0.1576	0.4903	3.245
60	983.2	4.182	466.6	0.4746	654.4	0.1592	0.5221	2.981
65	980.6	4.184	433.5	0.4420	659.1	0.1606	0.5528	2.752
70	977.9	4.188	404.1	0.4132	663.2	0.1620	0.5827	2.551
75	975.0	4.191	378.0	0.3877	666.9	0.1632	0.6118	2.375
80	971.9	4.195	354.6	0.3648	670.2	0.1644	0.6402	2.219
85	968.8	4.199	333.6	0.3443	673.0	0.1654	0.6682	2.081
90	965.5	4.204	314.6	0.3259	675.5	0.1664	0.6958	1.958
95	962.1	4.209	297.5	0.3092	677.5	0.1673	0.723	1.848
100	958.5	4.214	281.9	0.2941	679.3	0.1682	0.7501	1.749

Fuente: S.A. Klein y F.L. Alvarado, "Engineering Equation Solver Software (EES)", Academia Versión 6.271 (20-07-2001).

Anexo 2. Temp. de vaporización de compuestos inorgánicos y orgánicos.

TABLA 2-193 TEMPERATURAS DE VAPORIZACION DE COMPONENTES ORGANICOS E INORGANICOS

#	NOMBRE	FORMULA	CAS # SERV/ABSTR/QUIMICOS	PESO MOLECULAR	C1 X 1E-07	C2	C3	C4	Tmin, K	Δ Hc at, Tmin X 1E-07	Tmax, K	Δ Hc at, Tmax
214	Oxígeno	O2	7782447	31,999	0,9008	0,4542	-0,4096	0,3183	54,36	0,7742	154,58	0
215	Nitrogeno	N2	7727379	28,014	0,7491	0,40406	-0,317	0,27343	63,15	0,6024	126,2	0
216	Amoniaco	NH3	7664417	17,031	3,1523	0,3914	-0,2289	0,2309	195,41	2,5298	405,65	0
217	Hidracina	N2H4	302012	32,045	5,9794	0,9424	-1,398	0,8862	274,69	4,5238	653,15	0
218	Oxido Nitroso	N2O	10024972	44,013	3,3215	0,384	0	0	182,3	1,6502	309,57	0
219	Oxido Nitrico	NO	10102439	30,006	3,131	0,4056	0	0	109,5	1,4578	180,15	0
220	Cianogeno	C2N2	460195	52,036	3,384	0,3707	0	0	245,25	2,3803	400,15	0
221	Monoxido de carbono	CO	630080	28,01	0,8585	0,4921	-0,326	0,2231	68,13	0,6517	132,5	915280
222	Dioxido de Carbono	CO2	124389	44,01	2,173	0,382	-0,4339	0,42213	216,58	1,5202	304,21	0
223	Disulfato de Carbono	CS2	75150	76,143	3,496	0,2986	0	0	161,11	3,1537	552	0
224	Fluoruro de Hidrogeno	HF	7664393	20,006	13,451	13,36	-23,383	10,785	277,56	0,7104	461,15	0
225	Cloruro de Hidrogeno	HCl	7647010	36,461	2,2093	0,3466	0	0	158,97	1,7498	324,65	0
226	Bromuro de Hidrogeno	HBr	10035106	80,912	2,485	0,39	0	0	185,15	1,8817	363,65	0
227	Cianuro de Hidrogeno	HCN	748908	27,026	3,349	0,2053	0	0	259,83	2,8176	456,65	0
228	Sulfuro de Hidrogeno	H2S	7783064	34,082	3,5676	0,37358	0	0	187,68	1,9782	373,53	0
229	Dioxido de Sulfuro	SO2	7446095	64,065	3,676	0,4	0	0	197,67	2,8753	430,75	0
230	Trioxido de Sulfuro	SO3	7446119	80,064	7,337	0,5647	0	0	298,95	4,4303	490,85	0
231	Agua	H2O	7732185	18,015	5,2053	0,3199	-0,212	0,25795	273,16	404733	647,13	0

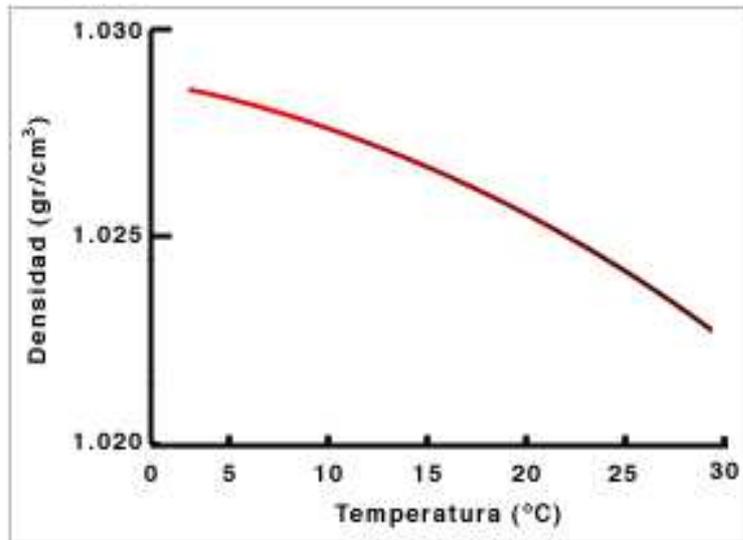
Las temperaturas están expresadas en grados Kelvin, y el calor de vaporización en J/Kmol
 $J/kmol \times 2.390E-04 = cal/gmol$; $J/kmol \times 4.302106E-04 = BTU/lbmol$

La ecuación usada para el calor de vaporización es:

$$\Delta H_c = C_1 X (1 - T_r)^{C_2 + C_3 T_r + C_4 T_r^2}$$

T es la temperatura reducida de T/Te.

Anexo 3. Densidad y viscosidad del agua de mar.



Densidad con	Salinidad 33 ‰	Salinidad 34,5 ‰	Salinidad 36 ‰
16 °C	1,025 g/cm³	1,026 g/cm³	1,0265 g/cm³
20 °C	1,0235 g/cm³	1,025 g/cm³	1,0255 g/cm³
25 °C	1,022 g/cm³	1,023 g/cm³	1,024 g/cm³
28 °C	1,0215 g/cm³	1,0225 g/cm³	1,023 g/cm³
30 °C	1,020 g/cm³	1,0215 g/cm³	1,0225 g/cm³

Viscosidad dinámica y cinemática del agua en unidades del sistema internacional:

Temperatura - t - (° C)	<u>Viscosidad dinámica</u> - μ - (Pa s, N s / m ²) x 10 ⁻³	<u>Viscosidad Cinemática</u> - ν - (m ² / s) x 10 ⁻⁶
0	1.787	1.787

Temperatura - t - ($^{\circ}$ C)	<u>Viscosidad dinámica</u> - μ - (Pa s, N s / m ²) x 10 ⁻³	<u>Viscosidad Cinemática</u> - ν - (m ² / s) x 10 ⁻⁶
5	1.519	1.519
10	1.307	1.307
20	1.002	1.004
30	0.798	0.801
40	0.653	0.658
50	0.547	0.553
60	0.467	0.475
70	0.404	0.413
80	0.355	0.365
90	0.315	0.326
100	0.282	0.29

http://www.engineeringtoolbox.com/water-dynamic-kinematic-viscosity-d_596.html

Anexos 4. Coeficiente individual de película “h”

COEFICIENTES INDIVIDUALES DE PELICULA “h”		
FLUIDO	Btu/(pie ² °F hr)	Kcal/(m ² °C hr)
Agua	265 - 1940	1290 - 9460
Gases	2.6 - 44	13 - 215
Solventes orgánicos	60 - 350	300 - 1700
Aceites	10 - 120	50 - 600

Anexo 5. Especificación técnica de tubos de diferentes medidas.

<u>Especificaciones Tecnicas de Conexión Soldable con Costura y sin Costura</u>																	
Fabricado de acuerdo a la Norma ASTM-A-403, ANSI B 16.11 Y ANSI B 16.9										TIPOS DE INOXIDABLE T-304/L T-316/L							
DIAMETRO NOMINAL		DIAMETRO EXTERIOR		CEDULAS / SCHEDULES													
PIPE SIZE		OUTSIDE DIAMETERS															
pulg.	mm	pulg.	mm	5 S	5	10 S	10	20	30	40 S STD	40	60	80 S EH	80	120	160	XXS
inch	mm	inch	mm														
1/8	3	0.41	10.3		0.04	0.05	0.049			0.068	0.068		0.095	0.095			
					0.2	0.27	0.27			0.36	0.36		0.46	0.46			
1/4	6	0.54	13.7		0.05	0.07	0.065			0.088	0.088		0.119	0.119			
					0.38	0.48	0.48			0.62	0.62		0.79	0.79			
3/8	10	0.68	17.1		0.05	0.07	0.065			0.091	0.091		0.126	0.126			
					0.48	0.62	0.62			0.84	0.84		1.09	1.09			
1/2	13	0.84	21.3	0.065	0.07	0.08	0.083			0.109	0.109		0.147	0.147		0.188	0.294
				0.79	0.79	0.99	0.99			1.25	1.25		1.61	1.61		1.93	2.53
3/4	19	1.05	26.7	0.065	0.07	0.08	0.083			0.113	0.113		0.154	0.154		0.200	0.308
				1.01	1.01	1.26	1.26			1.67	1.67		2.18	2.18		2.87	3.61
1	25	1.32	33.4	0.065	0.07	0.11	0.109			0.133	0.133		0.179	0.179		0.250	0.382
				1.28	1.28	2.07	2.07			2.48	2.48		3.21	3.21		4.2	5.41
1 1/4	32	1.66	42.2	0.065	0.07	0.11	0.109			0.145	0.145		0.191	0.191		0.250	0.382
				1.63	1.63	2.67	2.67			3.36	3.36		4.43	4.43		5.57	7.17
1 1/2	38	1.9	48.3	0.065	0.07	0.11	0.109			0.145	0.145		0.200	0.200		0.281	0.400
				1.88	1.88	3.08	3.08			4.02	4.02		5.37	5.37		7.19	9.48
2	51	2.38	60.3	0.065	0.07	0.11	0.109			0.154	0.154		0.219	0.219		0.344	0.436
				2.37	2.37	3.9	3.9			5.4	5.4		7.46	7.46		11.04	13.36
2 1/2	64	2.88	73	0.083	0.08	0.120	0.120			0.203	0.203		0.276	0.276		0.375	0.552
				3.66	3.66	5.22	5.22			8.57	8.57		11.33	11.33		14.81	20.26
3	76	3.5	88.9	0.083	0.08	0.120	0.120			0.216	0.216		0.300	0.300		0.438	0.600
				4.48	4.48	6.41	6.41			11.21	11.21		15.17	15.17		21.9	27.49

Anexo 6. Especificación técnica de tubos de acero inoxidable.

Tubo Acero Inoxidable sin soldadura

Norma ASTM-A-312 ANSI B-36-19 Certificados S/ASTM-A-530 DIN-50049

Calidades TP AISI-304-L y AISI-316-L

DN	Diámetro pulgadas	Diámetro milímetros	Espesores de pared y pesos por metro					
			SCHEDULE 10 S		SCHEDULE 40 S		SCHEDULE 80 S	
			mm	k/m	mm	k/m	mm	k/m
8	1/4	13,17	1,65	0,5	2,24	0,64	3,02	0,81
10	3/8	17,15	1,65	0,64	2,31	0,86	3,2	1,12
15	1/2	21,34	2,11	1,02	2,77	1,29	3,73	1,64
20	3/4	26,67	2,11	1,3	2,87	1,71	3,91	2,23
25	1	33,4	2,77	2,12	3,38	2,54	4,55	3,29
32	1,1/4	42,16	2,77	2,73	3,56	3,44	4,85	4,53
40	1,1/2	48,26	2,77	3,15	3,68	4,11	5,08	5,49
50	2	60,33	2,77	3,99	3,91	5,52	5,54	7,6
65	2,1/2	73,03	3,05	5,34	5,16	8,77	7,01	11,59
80	3	88,9	3,05	6,56	5,49	11,45	7,62	15,51
100	4	114,3	3,05	8,5	6,02	16,32	8,56	22,62
125	5	141,43	3,4	11,74	6,55	22,1	9,52	31,44
150	6 *	168,28	3,4	14,04	7,11	28,69	10,97	43,16
200	8 *	219,08	3,76	20,24	8,18	43,13	12,7	64,54
250	10 *	273,05	4,2	28,17	-	-	-	-
300	12 *	323,85	4,57	36,51	-	-	-	-

* Sobre demanda

Anexo 7. Especificación mecánica de tubos.

Medida nominal		Cedula	Espesor de pared		Diámetro exterior		Peso aproximado		Presión interior de trabajo		Presión de ruptura		Presión exterior de trabajo		Presión de aplastamiento	
Pulg.	mm		Pulg.	mm	Pulg.	mm	lb/ft	Kg/m	(PSI)	Kg/cm ²	(PSI)	Kg/cm ²	(PSI)	Kg/cm ²	(PSI)	Kg/cm ²
1.8	3.2	10	0.049	1.24	0.405	10.29	0.190	0.283	3550	250	18670	1315	2063	145	8252	580
		40	0.068	1.73			0.250	0.373	5170	365	27200	1915	3195	225	12780	900
		80	0.095	2.41			0.321	0.479	7670	540	43230	3040	4310	381	21640	1524
1.4	6.4	10	0.065	1.65	0.540	13.72	0.337	0.502	3540	250	19960	1405	2063	145	8252	580
		40	0.088	2.24			0.435	0.648	5000	350	28170	1980	3195	225	12780	900
		80	0.119	3.02			0.547	0.815	7110	500	40070	2820	4096	288	16384	1152
3.8	9.5	10	0.065	1.65	0.675	17.15	0.433	0.645	2770	195	15630	1100	1453	102	5812	408
		40	0.091	2.31			0.580	0.864	4020	285	22840	1595	2512	177	10048	708
		80	0.126	3.20			0.756	1.126	5830	410	32900	2315	4096	288	16384	1152
1.2	12.7	5	0.065	1.65	0.840	21.34	0.550	0.819	2190	155	12360	870	1087	78	4348	304
		10	0.083	2.11			0.687	1.023	2860	200	16110	1135	1453	102	5812	408
		40	0.109	2.77			0.871	1.297	3850	270	21730	1530	2063	145	8252	580
3/4	19.1	5	0.065	1.65	1.050	28.67	0.699	1.041	1730	120	9760	685	825	58	3800	232
		10	0.083	2.11			0.877	1.307	2250	160	12670	890	1087	78	4348	304
		40	0.109	2.77			1.121	1.670	3010	210	16990	1195	1453	102	5812	408
1	25.4	5	0.065	1.65	1.315	33.4	0.887	1.321	1370	95	7720	545	600	42	2400	168
		10	0.109	2.77			1.437	2.140	2360	165	13320	935	1189	84	4756	336
		40	0.133	3.38			1.718	2.559	2930	205	16520	1165	1453	102	5812	408
1 1/4	31.8	5	0.065	1.65	1.680	42.16	1.132	1.686	1070	75	6060	425	400	28	1600	112
		10	0.109	2.77			1.846	2.752	1840	130	10400	730	889	63	3556	252
		40	0.140	3.56			2.327	3.466	2410	170	13580	955	1189	84	4756	336
1 1/2	38.1	5	0.065	1.65	1.900	48.26	1.302	1.940	940	65	5270	370	345	24	1580	98
		10	0.109	2.77			2.134	3.178	1600	115	9020	635	769	54	3076	216
		40	0.145	3.68			2.778	4.138	2190	150	12180	855	1087	78	4348	304
2	50.8	5	0.065	1.65	2.375	60.33	1.639	2.442	740	50	4190	295	234	16	836	64
		10	0.109	2.77			2.700	4.022	1270	90	7150	505	533	38	2132	152
		40	0.154	3.91			3.736	5.565	1820	130	10250	720	889	63	3556	252
2 1/2	63.5	5	0.083	2.11	2.875	73.03	2.534	3.776	790	55	4440	310	248	17	992	88
		10	0.120	3.05			3.614	5.384	1150	80	6480	455	461	32	1644	128
		40	0.203	5.16			5.931	8.834	1990	140	11230	790	1000	70	4000	280
3	76.2	5	0.083	2.11	3.500	88.9	3.101	4.619	640	45	3630	255	190	13	760	52
		10	0.120	3.05			4.434	6.605	940	65	5250	370	345	24	1380	96
		40	0.216	5.49			7.755	11.552	1730	120	9740	685	825	58	3300	232
3 1/2	88.9	5	0.083	2.11	4.0	101.6	3.555	5.295	580	40	3170	225	153	11	612	44
		10	0.120	3.05			5.090	7.582	820	60	4610	325	293	20	1132	80
		40	0.226	5.74			9.319	13.690	1570	110	8880	625	704	50	2616	200

<http://www.idasa.com.mx/pict/07ta.gif>

Anexo 8. Espesores mínimos de los espejos.

TABLA RCB-7.22M
TABLA DE LIGAMENTOS, PLACAS TUBULARES Y TUBOS RECOMENDADOS
PARA GASES PESADOS (todas las medidas estan en mm.)

Tubo Dia d_o	Paso Del tubo p	p/d_o	$p - d_o$	Calibre BWG	Dia. Orific io Acop le stán d.	Anch o del ligam ento	Ligamentos mínimos std. (el 96% de los ligamentos deben ser igual o mayor a los valores tabulados abajo)										Ligam entos min. admisi ble
							Espesor de láminas tubulares										
							25.4	38.1	50.8	63.5	76.2	101.6	127.0	152.4			
6.4	7.94	1.25	1.59	22	6.579	1.372	0.635	0.635	0.635	0.635	-	-	-	-	0.635		
	9.53	1.50	3.18	20		2.946	2.108	1.956	1.778	1.626	-	-	-	-	1.524		
9.5	11.51	1.21	1.98	20	9.754	1.753	1.041	0.914	0.813	0.711	0.610	-	-	-	0.762		
	12.70	1.33	3.18	18		2.946	2.210	2.108	2.007	1.905	1.778	1.575	-	-	1.524		
	13.49	1.42	3.97	18		3.734	3.023	2.896	2.794	2.692	2.591	2.362	2.159	1.930	1.905		
12.7	15.88	1.25	3.18	18	12.954	2.921	2.261	2.159	2.063	2.007	1.930	1.753	1.600	-	1.524		
	16.67	1.31	3.97	16		3.708	3.048	2.972	2.870	2.794	2.718	2.565	2.388	2.235	1.905		
	17.46	1.38	4.76	16		4.521	3.836	3.759	3.663	3.607	3.505	3.353	3.200	3.023	2.286		
15.9	19.05	1.20	3.18	16	16.129	2.921	2.032	1.956	1.905	1.829	1.778	1.651	1.499	1.372	1.524		
	19.84	1.25	3.97	15		3.708	2.819	2.769	2.692	2.616	2.565	2.438	2.311	2.184	1.905		
	20.64	1.30	4.76	14		4.521	3.607	3.556	3.480	3.429	3.353	3.226	3.099	2.972	2.286		
	22.23	1.40	6.35	14		6.096	5.207	5.131	5.080	5.004	4.953	4.801	4.674	4.547	3.048		
19.1	23.81	1.25	4.76	13	19.304	4.521	3.632	3.581	3.531	3.480	3.429	3.302	3.200	3.099	2.286		
	25.40	1.33	6.35	12		6.096	5.232	5.182	5.105	5.055	5.004	4.902	4.801	4.674	3.048		
	26.99	1.42	7.94	12		7.696	6.807	6.756	6.706	6.655	6.604	6.477	6.375	6.274	3.810		
	28.58	1.50	9.53	12		9.271	8.407	8.357	8.280	8.230	8.179	8.077	7.976	7.849	4.699		
22.2	27.78	1.25	5.56	12	22.479	5.309	4.445	4.394	4.343	4.318	4.267	4.166	4.064	3.968	2.667		
	28.58	1.29	6.35	12		6.096	5.232	5.207	5.156	5.105	5.055	4.953	4.877	4.775	3.048		
	30.16	1.36	7.94	10		7.696	6.833	6.782	6.731	6.680	6.655	6.553	6.452	6.375	3.810		
	31.75	1.43	9.53	10		9.271	8.407	8.382	8.331	8.280	8.230	8.128	8.052	7.950	4.699		
25.4	31.75	1.25	6.35	10	25.705	6.045	5.207	5.156	5.131	5.080	5.029	4.953	4.877	4.801	3.048		
	33.34	1.31	7.94	9		7.645	6.782	6.756	6.706	6.680	6.629	6.553	6.477	6.375	3.810		
	34.93	1.38	9.53	9		9.220	8.382	8.331	8.306	8.255	8.204	8.128	8.052	7.976	4.699		
31.8	36.69	1.25	7.94	9	32.106	7.595	6.756	6.731	6.680	6.655	6.629	6.553	6.502	6.426	3.810		
38.1	47.63	1.25	9.53	8	38.557	9.068	8.255	8.230	8.204	8.179	8.153	8.077	8.026	7.976	4.572		
50.8	63.50	1.25	12.70	6	51.359	12.141	-	11.328	11.303	11.278	11.252	11.227	11.176	11.125	6.350		
63.5	79.38	1.25	15.88	6	64.211	15.164	-	14.35	14.34	14.32	14.304	14.27	14.24	14.21	7.62		
76.2	95.25	1.25	19.05	6	77.038	18.212	-	17.41	17.4	17.38	17.369	17.34	17.31	17.29	8.89		

Notas: la tabla anterior de los ligamentos estándar mínimos se basa en un ligamento inferior o igual a la suma de dos veces la broca del taladro más una tolerancia de 0.50mm por tubo, menos que el 15.9mm del diámetro exterior y 0.76mm del diámetro interior por tubos.

La tolerancia de la broca es =0.041(Espesor de la placa de tubos en diámetros de tubo)

*para las placas de tubos con espesores mayores que 152.mm es admisible determinar ligamentos estándares mínimos de acuerdo con la nota arriba