

MM-2006-I-01

**DISEÑO DE UNA UNIDAD PORTÁTIL
DE DESTILACIÓN DE AGUA
PARA EFECTOS DE POTABILIZACIÓN**

OSCAR RENÉ ARDILA SANABRIA

**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
BOGOTÁ D.C
2006**

**Diseño De Una Unidad Portátil
De Destilación De Agua
Para Efectos De Potabilización**

**OSCAR RENÉ ARDILA SANABRIA
Proyecto de grado para optar al Título de M.Sc.
en Ingeniería Mecánica**

Asesor

Ingeniero Rafael Guillermo Beltrán
Profesor Asociado

**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
BOGOTÁ D.C
2006**

CARTA DE PRESENTACIÓN

Profesor

LUIS MARIO MATEUS SANDOVAL

Director

Departamento de Ingeniería Mecánica

Universidad de los Andes

Estimado profesor Mateus,

Por medio de la presente me permito poner en consideración el proyecto de grado titulado: “**Diseño de una unidad portátil de destilación de agua para efectos de potabilización**”, como requisito parcial de grado del programa de Magíster en Ingeniería Mecánica.

Agradezco su amable atención.

Atentamente,

Oscar René Ardila Sanabria

AGRADECIMIENTOS

En esta ocasión no quisiera extenderme en los agradecimientos debido a que no quiero entrar en los típicos agradecimientos que suelen hacer las personas en esta hoja.

Obviamente tengo que nombrar a mi familia que son los autores indirectos de cualquier acción que yo adelante.

También quisiera agradecer al Profesor Rafael Beltrán, por darme la confianza y su nombre para soportar un trabajo de este tipo. También extendiendo el agradecimiento al profesor Álvaro Pinilla que bajo la figura de un jurado, siempre consideró este trabajo como una herramienta útil frente a las necesidades que él ha trabajado.

Pero existieron dos personas que a lo largo de este proyecto se hicieron más partícipes que yo y en ciertos momentos fueron el único motor que tuvo este trabajo. Estas dos personas o mujeres para ser más específico, son las que se merecen todos los aplausos en los objetivos alcanzados porque “arriaron” mi ánimo cuando más lo necesitaba. Mis agradecimientos exclusivos no son para nadie más que para Bibiana Amaya e Isabel Jiménez.

Bibiana: Gracias por estar ahí, por aguantar las pataletas, por querer hacerme ver que más allá de los problemas están las satisfacciones. De verdad no sé qué hubiera pasado si no hubieras hecho todo lo que hiciste.
GRACIAS

Isabel: Aunque sé que consideras que puedo llegar a ser exagerado, en verdad fuiste un gran motor para el avance de este proyecto. Como decía Bibiana, tú eras la persona a la que yo le terminaba haciendo caso. Es por esas palabras de aliento y/o regaño que esta investigación se pudo terminar.

A todos los demás que saben que estuvieron ahí, perdón por no nombrarlos, pero también saben que en el fondo les agradezco todo.

“Face it, your never gonna make it!”
“I don’t wanna make it, I just, w anna”
Gerard Way, “I’m not okay”

INDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO 1	2
1. MARCO TEÓRICO	2
1.1 Potabilización de agua.....	2
1.2 Concepto de agua potable	2
1.3 Tecnologías de desalinización.....	5
1.3.1. Tecnologías de membrana.....	6
1.3.1.1. Ósmosis inversa.....	6
1.3.1.2. Nanofiltración.....	8
1.3.1.3. Microfiltración.....	8
1.3.1.4. Ultrafiltración.....	8
1.3.1.5. Electrodialisis.....	9
1.3.2. Tecnologías térmicas	10
1.3.2.1. MSF	10
1.3.2.2. MED.....	11
1.3.2.3. VC.....	11
1.4 Destilación multiefecto	12
CAPITULO 2	16
2 DESCRIPCIÓN DE LA UNIDAD	16
2.1 MesoStill	16
2.2 Geometría de la Unidad	17
2.2.1. Cilindro de calentamiento.....	19
2.2.2. Primer efecto	19
2.2.2.1. Cámara de ebullición.....	19
2.2.2.2. Cámara de condensación	20
2.2.2.3. Cámara de sobrelleado.....	21
2.2.3. Segundo efecto	21
2.3 Funcionamiento de la unidad.....	22
CAPITULO 3	24
3. DISEÑO DE LA UNIDAD	24
3.1 Consideraciones Generales	24
3.2 Diseño preliminar	24
3.3 Fuente de calentamiento	27
3.3.1. Transferencia de calor	29
3.4 Construcción de la unidad.....	31
CAPITULO 4	33
4. RESULTADOS OBTENIDOS	33
4.1 Pruebas sobre la geometría	33
4.2 Evaluación coeficiente de convección	35
4.3 Pruebas de salinidad	36
4.4 Análisis de gases	38
CAPITULO 5	39
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	39
5.1 Pruebas sobre la geometría	39
5.2 Evaluación coeficiente de convección	41
5.3 Pruebas de salinidad	43

5.4 Análisis de gases	44
CAPITULO 6	45
6. CONCLUSIONES	45
7. BIBLIOGRAFÍA.....	47
7.1 Referencias en internet	48
ANEXO I.....	49

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1-1 Capacidad total de las plantas de desalinización en todo el mundo, por tipo de tecnología utilizada.....</i>	<i>6</i>
<i>Figura 1-2 Técnicas de soporte de las membranas en ósmosis inversa</i>	<i>7</i>
<i>Figura 1-3 Funcionamiento de unidad de electrodiálisis.....</i>	<i>9</i>
<i>Figura 1-4 Esquema de la compresión de vapor</i>	<i>12</i>
<i>Figura 1-5 Destilación Multiefecto con evaporadores horizontales.....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 1-6 Intercambiador de calor de placas agujereadas</i>	<i>15</i>
<i>Figura 2-1 MesoStill</i>	<i>16</i>
<i>Figura 2-2 Diagrama de flujo básico de la unidad MesoStill.....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 2-3 Esquema de la estructura del primer efecto.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 3-1 Vista explosionada del primer diseño elaborado.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 3-2 Máquina de prototipo rápido.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 3-3 Prototipo del diseño planteado</i>	<i>26</i>
<i>Figura 3-4 Detalle de la fuente de calentamiento</i>	<i>28</i>
<i>Figura 3-5 Cambios en la fuente de calentamiento</i>	<i>28</i>
<i>Figura 3-6 Curva de ebullición para agua a 1 atm.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 3-7 Regímenes de ebullición.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 3-8 Unidad de destilación construida.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 4-1 Montaje de la prueba de geometría</i>	<i>35</i>
<i>Figura 4-2 Montaje de la prueba de salinidad.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 4-3 Montaje del análisis de gases realizado.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 5-1 Curvas de calentamiento de agua para una geometría típica (arriba) y para la geometría propuesta (abajo).....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 5-2 Rendimiento del calentamiento con distintas geometrías.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 5-3 Curvas de calentamiento de la unidad de destilación.....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 5-4 Curva de calibración del conductímetro.....</i>	<i>43</i>

INDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1-1</i> Parámetros de calidad del agua.....	3
<i>Tabla 1-2</i> Comparación de estándares de agua potable ($\mu\text{g/l}$).....	3
<i>Tabla 1-3</i> Métodos de desalinización según cantidad de sólidos presentes.....	5
<i>Tabla 2-1</i> Características principales del MesoStill.....	17
<i>Tabla 3-1</i> Características principales de la fuente de calentamiento.....	27
<i>Tabla 4-1</i> Resultados de la prueba de calentamiento sin la geometría propuesta.....	33
<i>Tabla 4-2</i> Resultados de la prueba de calentamiento con la geometría propuesta.....	34
<i>Tabla 4-3</i> Resultados en la determinación del coeficiente de convección.....	35
<i>Tabla 4-4</i> Resultados de la prueba de salinidad con apertura de llama baja.....	37
<i>Tabla 4-5</i> Resultados de la prueba de salinidad con apertura de llama alta.....	38
<i>Tabla 5-1</i> Características principales de la unidad de destilación.....	39
<i>Tabla 5-2</i> Costos relacionados a la unidad de destilación.....	39
<i>Tabla 5-3</i> Resultados de la prueba de salinidad con apertura de llama baja.....	43
<i>Tabla 5-4</i> Resultados de la prueba de salinidad con apertura de llama alta.....	44

INTRODUCCIÓN

El agua potable se ha convertido en uno de los principales requerimientos para el desarrollo de la vida misma sobre la faz de la tierra. En los últimos años la humanidad se ha percatado de esta importancia, a la vez que se da cuenta de su inminente escasez. El agua natural puede contener una alta variedad de impurezas debido a la gran cantidad de cambios que experimenta durante el ciclo hidrológico, impurezas que pueden llegar a considerarse como contaminantes dependiendo de la nocividad que representen ante el uso final del líquido.

Quando el agua se destina a ser para el consumo humano, se regula por medio de normas bacteriológicas y fisicoquímicas expedidas por la Organización Mundial de la Salud. Obviamente, la ingestión de aguas que no cumplan con este tipo de normas, implica un riesgo contra la salud de las personas; dentro de los efectos de la ingestión de aguas contaminadas cuentan enfermedades gastrointestinales, pulmonares, cancerígenas e incluso la muerte.

Las técnicas de tratamiento de agua son variadas debido a la variabilidad de las impurezas y a las condiciones requeridas para el agua como producto. Una de estas técnicas es la destilación, que es el único método que con seguridad elimina las bacterias, virus y pirógenos presentes en el líquido. Es por esta razón que una unidad de destilación de agua portátil que sea capaz de producir agua potable a partir de un reservorio de agua, representa una necesidad crítica para unidades militares en combate y además puede convertirse en un accesorio adicional en actividades de camping, excursiones y pesca en altamar.

Con este trabajo se pretende realizar un prototipo que cumpla con ciertas especificaciones tanto de diseño como de producto final, permitiendo introducir tecnologías nuevas en primera medida en la Universidad de los Andes, y posteriormente en todo el país. El desarrollo de este destilador generará un producto con la innovación de poder ser transportado a cualquier lugar, aumentando así las aplicaciones de la destilación para efectos de potabilización, que hasta el momento sólo han producido plantas a gran escala.

CAPITULO 1

1. MARCO TEÓRICO

1.1 Potabilización de agua

Tan sólo el 3 por ciento del agua total en el planeta se puede considerar para consumo humano¹, y es por esta razón que se hace necesario el estudio de los procesos que se pueden establecer para lograr agua potable. La desalinización de agua es el proceso de remoción de sólidos disueltos presentes en el líquido, especialmente aquellos compuestos como las sales disueltas y otros inorgánicos.

Hasta mediados del siglo XX el concepto de agua potable se limitaba a que el agua fuera sana, es decir, que no tuviera altas concentraciones de cloro y/o bacterias. Gracias a la introducción de políticas de control, como las establecidas en WHO Guidelines for Drinking Water Quality, se ha logrado esclarecer el concepto de agua potable y los requerimientos tanto químicos como biológicos que se necesitan para calificar una muestra de agua como sana.

Teóricamente es posible la producción de agua potable a partir de cualquier fuente de agua, pero en la práctica existen algunas restricciones que se deben tener en cuenta (costos, aspectos ambientales y ecológicos, aspectos estéticos). Actualmente existen varios métodos que permiten obtener un producto con los requerimientos establecidos para el agua potable, entre los que podemos contar coagulación, floculación, filtración, adsorción, adición de químicos, y por supuesto, la destilación.

Uno de los aspectos más importantes en cuanto a desalinización es el referente a los costos, que incluyen los costos capitales y los costos de operación. Estos últimos pueden variar bastante dependiendo del lugar, del tipo de fuente de agua, de la calidad final que se desea en el agua, y de la capacidad deseada (tamaño de la planta).

1.2 Concepto de agua potable

La calidad del agua depende mucho de la fuente de la cual se obtiene, y es muy común encontrar que sea cual sea la fuente, el líquido estará provisto de compuestos indeseables como material orgánico y biológico, minerales, sólidos disueltos, entre otros. Por lo tanto es necesario establecer parámetros definidos que nos permitan identificar la calidad del agua en cualquier momento. Los parámetros más reconocidos internacionalmente se muestran en la Tabla 1-1:

¹ CB, 2004. Pág 8

Tabla 1-1 Parámetros de calidad del agua

Parámetros físico-químicos	Parámetros biológicos
Sabor, color y olor	D.B.O. ²
Turbiedad (compuestos insolubles)	D.Q.O. ³
Sólidos totales	Coliformes totales y fecales
pH	
Dureza	

En la práctica, en cualquier lugar del mundo se considera agua potable a aquella que no posea coliformes y *Escherichia Coli.*; a pesar de esto, desde la década del 50 se han añadido parámetros adicionales que han permitido esclarecer el efecto de los contaminantes presentes en el agua sobre la salud humana. Este aumento en el control de químicos presentes en el agua ha sido respuesta al avance tecnológico de las técnicas de análisis químicos. Los estándares de estos parámetros adicionales varían según la locación, por ejemplo: De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (WHO por sus siglas en inglés), la cantidad de sólidos disueltos totales presentes en el agua potable debe ser menor a 1000 mg/L, cifra que se usa para poder asegurar que el líquido no posee ninguna clase de sabor; por otro lado, la Agencia de Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos (EPA por sus siglas en inglés) asegura como condición para agua potable, que este mismo parámetro no exceda los 500 mg/L⁴.

Existen 3 directivas que se caracterizan por ser las más importantes en el mundo, de las cuales se hace una comparación en la Tabla 1-2:

1. WHO Guidelines for Drinking-water Quality
2. 1998 European Union Drinking Water Directive (UK y UE)
3. National Primary and Secondary Drinking Water Regulations (USA)

Tabla 1-2 Comparación de estándares de agua potable (µg/l)

Parámetro	WHO	98/83/EC	USA
Turbidez (NTU)*	5	Aceptable	5
Color (TCU)**	15	Aceptable	15
Plomo	10	10	15
Hierro	300	200	300
Arsénico	10	10	50
Cadmio	3	5	5
Nitratos	50 mg/l	50	44

² D.B.O: Demanda Biológica de Oxígeno

³ D.Q.O: Demanda Química de Oxígeno

⁴ EPA, 2002.

Parámetro	WHO	98/83/EC	USA
Bacterias	0	0	0
Coliformes			
Escherichia Coli	0	0	0

* NTU: Unidades nefelométricas de turbidez.

** TCU: Unidades de color verdadero.

Vale la pena entrar más a fondo en la descripción de algunos de los parámetros más importantes:

Turbidez: A pesar que la turbidez es causada por los sólidos disueltos en el agua, ambas medidas no poseen una relación lineal. Esto es debido a que la cantidad de sólidos disueltos se mide como el peso de los sólidos secos presentes en el agua, mientras que la turbidez es el efecto óptico medido por la dispersión de la luz que atraviesa la muestra del agua. La turbidez se expresa en unidades nefelométricas de turbidez (NTU, por sus siglas en inglés).

Color: Este parámetro mide la absorción de luz por parte de la muestra. Normalmente el color se establece por comparación con un arreglo de soluciones estándar de color. El color de una muestra de agua está íntimamente ligado con el pH de la solución, por lo que se recomienda reportar el pH de ésta.

Bacterias coliformes: Son bacterias presentes en el intestino humano o en el intestino de animales de sangre caliente. Son capaces de fermentar lactosa, formando gas y ácido en presencia de sales a una temperatura aproximada de 36°C⁵. Su detección y medición se hace por medios enzimáticos que serán explicados a continuación.

Escherichia Coli (E. Coli): La presencia de este tipo de bacteria, implica contaminación con heces fecales, debido a que sólo proviene de las heces humanas o animales. Puede fermentar lactosa a una temperatura de 44.5°C, y su presencia en el agua es inaceptable. Su detección y medición, al igual que las bacterias coliformes, se hace con Colilert el cual actúa como sustrato para las bacterias. Cuando las bacterias están presente, se presenta un color amarillo (coliformes) o fluorescente (E.Coli) bajo el efecto de una luz fluorescente.

La introducción de los distintos parámetros ha logrado que cada vez el agua llegue a ser más pura, y por ende, no tendrá efectos negativos sobre la salud humana. Pero a medida que se descubren más químicos presentes en el agua y se imponen restricciones sobre éstos, se hará necesaria una mayor inversión para el tratamiento del agua potable. Esto puede que no llegue a ser un problema para aquellos países denominados "ricos", ya que pueden abarcar la mayoría de su territorio;

⁵ Binnie et al, 2002.

pero en realidad sí representa una gran dificultad para los países menos adinerados. Estos países deben invertir casi todo su capital destinado a potabilización en unas pocas plantas de tratamiento, dejando de lado grandes áreas de su territorio nacional, en las cuales la calidad del agua no llega a cumplir los más mínimos requerimientos.

1.3 Tecnologías de desalinización

Existen diversas técnicas que se encargan de la remoción de sales disueltas del agua, y su escogencia depende de varios factores entre los que se incluyen: fuente del agua, el uso que se le piensa dar al agua tratada, el tamaño de la planta de tratamiento, los costos tanto de infraestructura como de proceso (energía, servicios, etc). Las dos tecnologías más importantes son las tecnologías térmicas y la de membrana, las cuales son las más usadas en el mundo.

Usualmente los procesos de desalinización se pueden escoger por la cantidad de sólidos suspendidos totales presentes en el agua; la escogencia se puede realizar como lo muestra la Tabla 1-3.

Tabla 1-3⁶ Métodos de desalinización según cantidad de sólidos presentes

Proceso	Sólidos suspendidos totales (mg/l)
Intercambio iónico	500-1000
Electrodiálisis	500-3000
Ósmosis Inversa (membranas normales)	500-5000
Ósmosis Inversa (membranas resistentes)	Más de 5000
Destilación	Más de 30000

La tendencia actual en cuanto a tecnologías se refiere, es el uso de tecnologías de membrana; los dispositivos térmicos, por su lado, dominaron desde los años 50 hasta hace unos pocos años, tal y como lo muestra la Figura 1-1.

Todos los datos que a continuación se muestran son realizados con base en el documento del CB, el cual se encuentra debidamente referenciado al final del documento.

⁶ Fuente: WEDC.

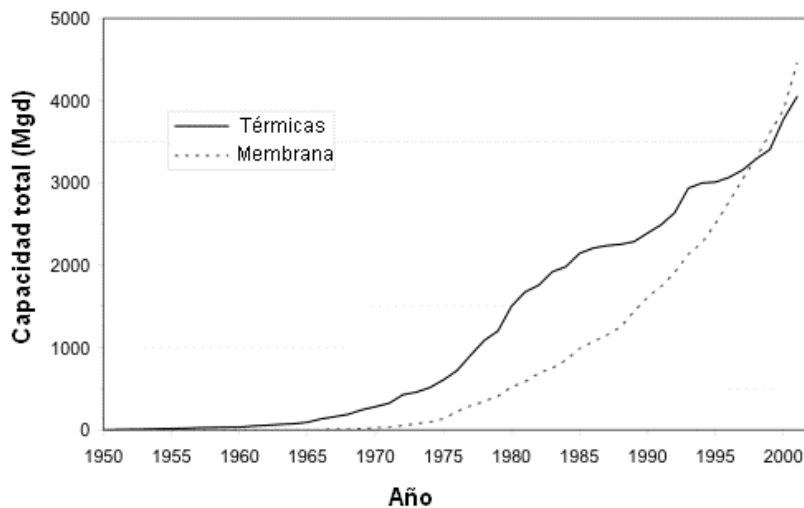


Figura 1-1 Capacidad total de las plantas de desalinización en todo el mundo, por tipo de tecnología utilizada.

Con el afán de no incurrir en consideraciones erróneas, la descripción que a continuación se muestra, no pretende favorecer ninguna técnica, sino que por el contrario se mostrarán los detalles más relevantes de cada una de ellas.

1.3.1. Tecnologías de membrana

El concepto de las tecnologías de membrana se basa en el paso selectivo del agua a través de membranas, permitiendo evitar la contaminación con iones, sólidos, entre otros. En los últimos años se ha incrementado el uso de este tipo de técnicas como solución al problema de la desalinización de agua, ya que los costos necesarios para el montaje de una planta de ósmosis inversa (uno de las tecnologías que hace uso de membranas) se han visto en constante decrecimiento.

1.3.1.1. *Ósmosis inversa*

En la ósmosis inversa se usan membranas para la remoción de sales presentes en salmueras o en agua de mar, aunque también se han usado para la remoción de algún tipo de compuestos moleculares orgánicos. En el proceso de ósmosis inversa, el agua de una solución salina presurizada se separa de las sales disueltas por medio del flujo a través de una membrana permeable. El permeado (el líquido fluyendo a través de la membrana) pasa a través de la membrana gracias al diferencial de presión existente entre el agua de alimentación y el agua de producto que está casi a presión atmosférica. El agua restante continúa en el lado presurizado del equipo, y es denominada salmuera o concentrado. La diferencia de presión es normalmente del orden de 10 MPa, y es la que ocasiona el mayor requerimiento de energía en esta técnica. La solución concentrada es separada del permeado por medio de una membrana

semipermeable, la cual trabaja como un filtro bastante fino; la membrana permite el paso de moléculas de agua, pero evita el movimiento de sales y otras moléculas. Los avances tecnológicos a lo largo de los años han permitido disminuir las presiones necesarias a menos de 6 MPa, sin ningún efecto en la calidad del permeado (Van der Bruggen, 2003).

Un sistema de ósmosis inversa consta de al menos 4 componentes o procesos: (1) pretratamiento de la alimentación, (2) presurización de la alimentación, (3) separación por medio de la membrana, y (4) tratamiento posterior al producto. La efectividad de la ósmosis inversa es tal que se pueden remover el 98% de las sales presentes en una fuente de agua con 3000 mg/l de sólidos disueltos totales, a un flujo normal de 24 l/m²/día. (UNEP, 1997)

Debido a que el flujo de agua a través de la membrana es muy lento, es necesario establecer que la membrana tenga un área bastante grande. Para este fin, las membranas se pueden arreglar en forma de espiral o en forma de tubos con un extremo sellado. En el diseño de espiral, la membrana se envuelve alrededor de polímeros compuestos, haciendo que el agua de alimentación fluya en espiral dentro de la membrana y el agua tratada se acumula en el tubo central. Para el otro diseño, se disponen una gran cantidad de tubos envueltos en membranas; el agua de alimentación se introduce en la unidad y el agua tratada se va almacenando en el interior de los tubos, para su posterior descarga.

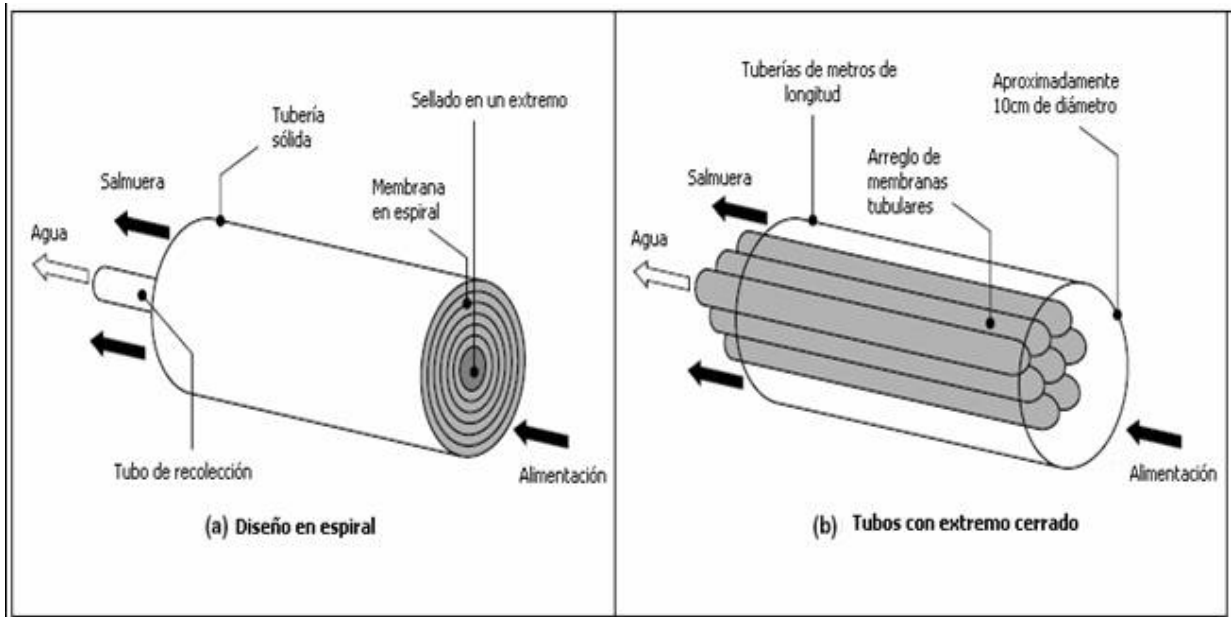


Figura 1-2 Técnicas de soporte de las membranas en ósmosis inversa.
Fuente: WEDC.

El tipo de membrana específica puede llegar a variar dependiendo de las presiones de operación y de los químicos que puedan estar presentes en

el agua de alimentación. Una de las desventajas de la ósmosis inversa es el pretratamiento al que se debe someter el agua de alimentación, ya que es posible que ciertas partículas dañen las membranas y sin control de pH, la deposición de sal en la superficie de la membrana aumenta y por ende disminuye la eficiencia de la operación. Las membranas por lo general están hechas de acetato de celulosa, poliamidas aromáticas o, tal como se están produciendo actualmente, hechas de capas finas de compuestos poliméricos. Otro de los avances a los que se ha llegado, es el desarrollo de membranas que evitan el ensuciamiento usando materiales que han sido irradiados con luz ultravioleta, lo cual evita en muchos casos el tratamiento previo.

El mayor problema que puede llegar a tener una planta de ósmosis inversa es el ensuciamiento de las membranas. Este ensuciamiento es causado cuando los poros de la membrana se taponan por sales o partículas suspendidas, lo cual limitará la cantidad de agua que se tratará.

El costo aproximado de la ósmosis inversa está alrededor de 0.80 US\$/m³ de agua (Van der Bruggen, 2003). Los costos más significantes, además de los costos capitales son los costos de electricidad, reemplazo de las membranas y la mano de obra. Las plantas de desalinización comerciales de ósmosis inversa operan a niveles de energía de alrededor de 18.8 kWh por 1000 galones de agua fresca [14].

1.3.1.2. Nanofiltración

La nanofiltración utiliza membranas que simplemente permiten el paso de iones monovalentes y algunos bivalentes, los cuales son los que poseen más movilidad. Las membranas son usadas para el ablandamiento del agua (es decir, la remoción de cationes bivalentes), para la remoción de algunos compuestos orgánicos e inorgánicos, y también de alguna clase de virus y patógenos. También se opera bajo una diferencia de presión inter-membrana del orden de 0.5 a 1.5 MPa, con la adición de un tamiz.

1.3.1.3. Microfiltración

En este caso, las membranas son utilizadas especialmente para la reducción de la turbidez del agua, por medio de la remoción de sólidos suspendidos y bacterias presentes en el agua. Su funcionamiento es el mismo que la nanofiltración, con diferencias de presión de 50 a 500 Kpa.

1.3.1.4. Ultrafiltración

La ultrafiltración es capaz de remover material suspendido, coloide y en algunos casos, moléculas orgánicas. Las membranas son usadas para la remoción de color, compuestos orgánicos de alto peso molecular, bacterias, y algunos virus. Se considera que las membranas usadas para ultrafiltración son capaces de remover partículas en el rango de 0.001 a

0.1 μm^7 . Su funcionamiento es muy similar a la de la nanofiltración, pero los órdenes de la diferencia de presión se encuentran en el rango de 50 a 500 Kpa.

1.3.1.5. Electrodialisis

A diferencia de las tecnologías anteriores, la fuerza motora de la difusión es un potencial eléctrico que es aplicado sobre la masa del líquido, lo cual genera un transporte de iones en direcciones opuestas. Las membranas usadas en este caso son selectivas a aniones o cationes, haciendo que el agua se pueda separar en sus constituyentes iónicos. Los iones disueltos presentes en una solución salina migran a los electrodos opuestos a sus cargas, pasando a través de membranas selectivas que permiten o no el paso de los cationes o aniones. Normalmente las membranas son puestas en un arreglo alterno, es decir, primero una membrana selectiva a aniones seguida de una selectiva a los cationes. Durante todo el proceso se van formando soluciones concentradas y diluidas entre los electrodos, tal como se muestra en la Figura 1-3. El sistema de electrodialisis inversa (EDR por sus siglas en inglés) invierte la polaridad del cambio eléctrico periódicamente, para que este cambio sea capaz de limpiar las impurezas que dejó la otra polaridad.

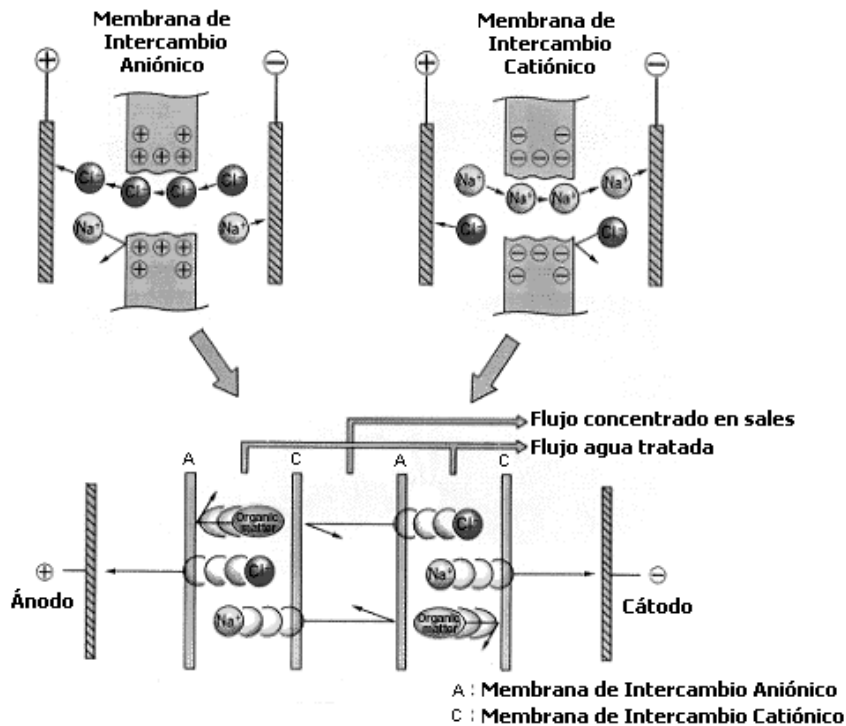


Figura 1-3 Funcionamiento de unidad de electrodialisis.
 Fuente: <http://www.astom-corp.jp/en/en-principle-001.html>

⁷ Binnie et al, 2002.

Las unidades de electrodiálisis están conformadas por centenares de celdas, como se denominan a los espacios existentes entre las dos membranas; el agua de alimentación atraviesa continuamente estas celdas, lo cual garantiza un flujo continuo de agua producto y concentrado. Las principales partes de una planta de electrodiálisis son el rectificador (quien produce la corriente directa), el grupo de membranas y las bombas de baja presión que permiten la circulación del agua en el sistema.

Esta técnica en realidad no es un verdadero proceso de purificación de agua, debido a que extrae solamente las sales ionizadas presentes en la alimentación dejando todos los demás compuestos en el agua tratada. Por lo tanto, no es muy recomendable en el uso de purificación de agua para acueductos municipales.

1.3.2. Tecnologías térmicas

Los procesos térmicos son los más usados en el continente americano debido a que estas tecnologías producen agua con alta pureza (debido a su baja concentración de TDS⁸) a partir de agua de mar, y además por el bajo costo del combustible. Este tipo de tecnologías se basa en el principio de calentamiento del agua para la formación del vapor de ésta, la cual es condensada nuevamente produciendo un agua más pura y sin presencia de sólidos. Las unidades de destilación están diseñadas de tal forma que se conserve de la mejor manera posible la energía térmica, por medio del intercambio de calor de condensación y el calor de evaporación dentro de los equipos. Por lo tanto, el mayor requerimiento de energías de estas tecnologías se encuentra en la entrega del calor de evaporación de la alimentación.

Además de las tecnologías mostradas a continuación, existen otras que han empezado a tomar fuerza, pero todavía no han llegado a una etapa de comercialización mundial. Estas técnicas son la destilación solar, la destilación por membrana y el congelamiento.

1.3.2.1. MSF

La destilación flash multietapa (MSF, por sus siglas en inglés) utiliza una serie de cámaras para vaporizar rápidamente el agua, a partir del seno de la salmuera. La evaporación flash consiste en la producción del vapor por una expansión brusca del líquido, el cual se encuentra a una temperatura cercana al punto de ebullición. Cada cámara va disminuyendo su presión y temperatura, y el vapor se condensa por la acción de los tubos de alimentación del agua, realizando una recuperación de energía a partir de este calor de condensación. Esta tecnología es capaz de una producción

⁸ Sólidos suspendidos totales, TDS por sus siglas en inglés.

bastante alta, y a pesar de los grandes requerimientos de energía, es casi la técnica más usada para desalinización.

Debido a la gran cantidad de alimentación necesaria en una planta MSF, alrededor del 65% de la salmuera remanente en la última etapa se mezcla con la alimentación para ser evaporada nuevamente a través de todas las etapas; además, los iones sulfato y bicarbonato presentes en el agua de mar pueden causar la deposición de calcio insoluble y compuestos de magnesio a elevadas temperaturas, lo cual acarrearía un problema de ensuciamiento en las superficies de transferencia de calor. Este tipo de realimentación también reduce la cantidad de químicos “acondicionadores” que se añaden para evitar el ensuciamiento y además reduce considerablemente los costos de operación. Pero estas plantas enfrentan el riesgo de la corrosión debida a altas concentraciones de salinidad, por lo que la salmuera restante (35%) debe ser arrojada al océano.

1.3.2.2. *MED*

La destilación multiefecto (*MED*, por sus siglas en inglés) es una aproximación a la evaporación de capa delgada, en la cual el vapor producido por una cámara se va a condensar en la siguiente. El diseño de este tipo de destilación se hizo de tal manera que se puede utilizar el calor latente de condensación del agua, para poder evaporar parte del agua de alimentación. Al igual que en el caso anterior, las cámaras van disminuyendo su presión y temperatura, lo cual provee el calor adicional de vaporización mencionado. Una de las ventajas frente a las demás tecnologías térmicas es su bajo consumo de potencia. Una descripción más detallada de esta técnica se dará en el siguiente capítulo.

1.3.2.3. *VC*

A diferencia de las demás tecnologías térmicas, ésta técnica no utiliza calor directo como fuente de energía térmica, ya que usa para tal fin la energía mecánica de compresión. La compresión de vapor es un proceso en el cual el vapor generado en un evaporador se comprime mecánicamente y el calor generado se usa para aumentar la temperatura de la alimentación de agua. Normalmente esta tecnología se usa en aquellos lugares donde los servicios de agua de enfriamiento y vapor de bajo costo nos son fáciles de adquirir.

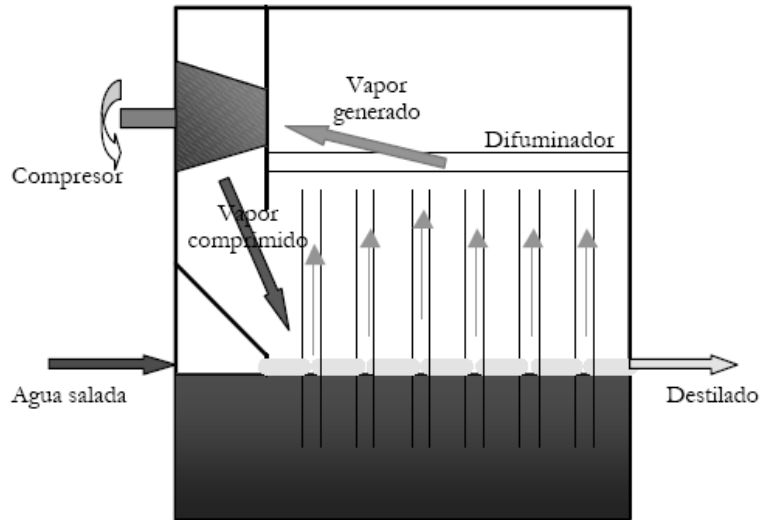


Figura 1-4 Esquema de la compresión de vapor
Fuente: CIRCE

1.4 Destilación multiefecto

La destilación multiefecto posee la ventaja de un requerimiento de energía más bajo comparado con la destilación flash y otras técnicas de desalinización. Según Morin (1993) si el diseño de la unidad MED logra que el efecto se encuentre a una temperatura cercana al punto de ebullición del agua en el primer efecto, se podría obtener casi 1 kg de agua destilada a partir de 1 kg de vapor.

La configuración más popular en las plantas MED se denomina tubo horizontal con película fina (HTTF, por sus siglas en inglés), en las cuales el vapor se condensa en la pared de un lado del tubo, mientras que la salmuera es evaporada en el otro lado del tubo. La energía usada para la evaporación es el calor de condensación del vapor. Este proceso se repite varias veces a lo largo de una serie de procesos de condensación-evaporación, procesos que se denominan efectos. En este tipo de configuración, se alcanzan altos coeficientes de transferencia de calor debido a la orientación de los fluidos dentro y fuera de los tubos; además, este diseño presenta estabilidad a condiciones parciales de operación debido a la poca cantidad de salmuera presente en cada uno de los efectos.

El vapor de calentamiento se lleva por el interior de los tubos del intercambiador de calor del primer efecto, y se condensa para formar el condensado o agua de producto. El calor latente se transfiere a través de la pared del tubo y calienta el agua concentrada en sales (salmuera), la cual se aplica en el lado externo de los tubos en la forma de una capa muy fina, de tal forma que el agua se pueda evaporar más fácilmente. Cuando la saturación se alcanza, sucede la evaporación en la capa de

agua sobre el tubo; el vapor generado en el primer efecto es llevado por el interior de los tubos hacia el segundo efecto. El vapor obtenido en el último efecto pasa a un condensador que actuará como la sección de rechazo de calor de la planta; para el enfriamiento de este condensador se usa agua de alimentación, de tal manera que pueda ser reintroducida con una temperatura más alta en el primer efecto (creando todo un ciclo de reciclaje de energía). En la Figura 1-5 se aprecia un esquema básico de una destilación multiefecto, basada en la configuración detallada.

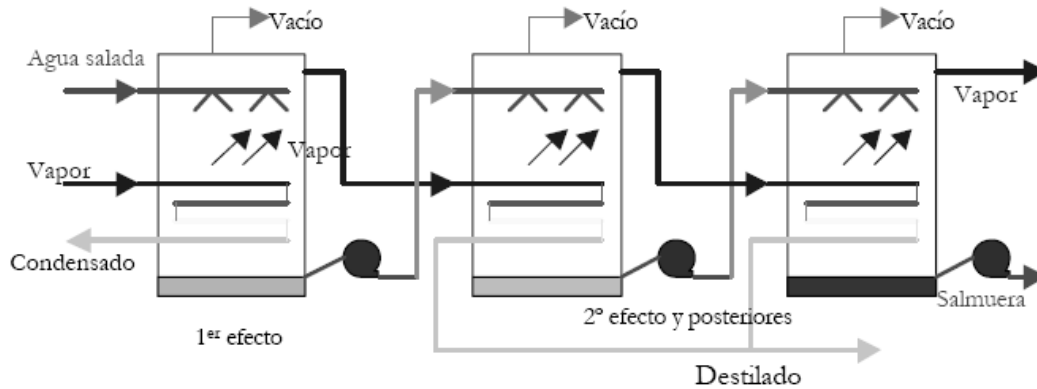


Figura 1-5 Destilación Multiefecto con evaporadores horizontales.
Fuente: CIRCE

Actualmente también se trabajan unidades MED en las cuales el arreglo de los tubos es vertical. En este tipo de unidad, el agua entra a los tubos por la parte superior y cae por efecto de la gravedad por la superficie interna de los tubos. Es en los evaporadores verticales de tubos largos en donde se alcanza una mayor evaporación que en los demás, están diseñados para trabajar en forma continua y se adaptan muy bien a la operación en múltiple efecto; aunque por lo general, se operan en un solo paso, llevando a cabo la concentración del líquido en el tiempo que tardan el líquido y el vapor desprendido en pasar a través del tubo.

El arreglo normal de una unidad HTTF consiste en tener la alimentación precalentada en un número de precalentadores (intercambiadores de calor) hasta una temperatura apenas debajo de la del primer efecto, teniendo a la vez alimentación hacia delante; la salmuera hace un solo paso en cada efecto. La purga de la salmuera del primer efecto (superior en caso que se tenga una arreglo vertical) se pasa al segundo efecto como su alimentación. La salmuera del segundo efecto se convierte en la alimentación del tercer efecto, y así continúa por toda la unidad. Con este arreglo la concentración de la salmuera aumenta a medida que disminuye la temperatura, así la concentración más baja estará en la temperatura más alta y la concentración más alta en la temperatura más baja. Este arreglo es el preferido para la desalinización de agua de mar porque disminuye la cantidad de incrustaciones en la tubería de la unidad, debidas a la acción de los sólidos disueltos en la salmuera; las condiciones de operación de la unidad MED tienen además la ventaja de

no intersecar la curva de solubilidad del sulfato de calcio, minimizando y hasta evitando el pretratamiento del agua de mar para su desalinización (Mbrin, 1993).

Otra de las ventajas ofrecidas en las unidades MED consiste en la no contaminación del destilado en caso de fugas en los tubos, ya que el lado del vapor se encuentra a una mayor presión que el lado de la salmuera. A pesar que la destilación MED es una tecnología más antigua que la destilación MSF, la primera no ha sido comercializada o expandida en la producción de agua. En los últimos años han aparecido plantas MED con características robustas, económicas y fáciles de operar, debido a que los equipos pueden llegar a ser construidos con aluminio u otros materiales de bajo costo.

Las primeras unidades MED se diseñaron con una temperatura máxima de alrededor 120°C, y debido a su operación (con recirculación de salmuera a un arreglo vertical de tubos) presentaron problemas de incrustaciones. Actualmente las unidades de destilación se diseñan y operan a temperaturas mucho más bajas (alrededor de 70°C), obteniendo beneficios como reducción de incrustaciones, de corrosión y de costos de operación. Esto también genera la desventaja de disminuir la eficiencia de la unidad debido a que el bajo rango de evaporación ocasiona un límite en el número de efectos prácticos. Termodinámicamente, el mínimo de energía requerido para la separación del agua pura a partir de agua de mar, es aproximadamente 2.67 kWh por mil galones de agua fresca [14]. Los avances tecnológicos en el esquema básico de la destilación han generado recortes significativos en el consumo de energía; para el caso de la destilación MED, los requerimientos de energía se ven reducidos en un factor igual al número de efectos de la destilación. Los procesos MED ofrecen eficiencias de hasta 20, dependientes de la temperatura máxima de operación y del número de efectos utilizados.

Mbrin (2003) presenta un resumen de los últimos avances en el estado del arte de la destilación MED, mostrando los últimos diseños de plantas multiefecto entre las cuales se encuentra el “tubo vertical aplado MED”, el cual consiste en dos silbs concéntricos con aproximadamente 30 efectos en total. El espacio anular de la unidad corresponde a la región de evaporación y los efectos están ordenados uno encima de otro. Otro de los diseños existentes se denomina “Intercambiador de placas agujereado” en el cual se usan placas planas soldadas en un patrón específico para que al expandirse con aire, simule una placa agujereada. El uso de este tipo de placas crea muy bien diferentes flujos para permitir el paso de vapor, de concentrado y de condensado, tal como se aprecia en la Figura 1-6.

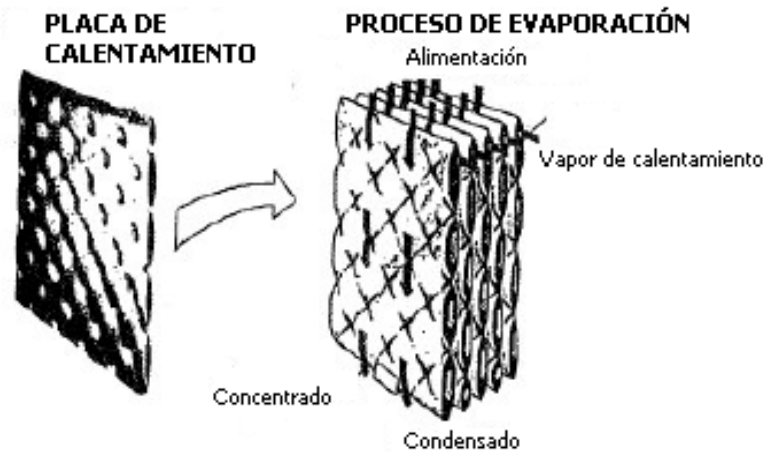


Figura 1-6 Intercambiador de calor de placas agujereadas
Fuente: Morin (2003)

CAPITULO 2

2 DESCRIPCIÓN DE LA UNIDAD

En este capítulo se darán a conocer los aspectos básicos de la unidad construida, permitiendo estar al tanto de las principales características que ésta posee.

2.1 MesoStill

En el año 2000, en el Congreso Internacional de Ingeniería Mecánica ASME, la empresa MesoSystems Technology Inc. presentó el diseño del MesoStill, un destilador multiefecto portátil que era capaz de producir 1 litro de agua potable en aproximadamente 5 minutos. Fue este proyecto el que motivó a los autores de este artículo a llevar a cabo la construcción de esta unidad para efectos de potabilización en la Universidad de los Andes.

En una primera revisión al documento presentado en dicho congreso, se pudieron establecer las principales partes del destilador obtenido, además de un bosquejo de lo que en realidad se quería para la unidad en la Universidad de los Andes. Las principales características que presentaba este equipo se muestran en la Tabla 2-1.



Figura 2-1 MesoStill

Tabla 2-1 Características principales del MesoStill

Característica	Valor numérico
Producción de destilado	50 mL / min
Volumen de la unidad	1.6 Li
Peso	1.1 Kg
Salinidad destilado	0.6 ppm
Destrucción patógena	> 99.99%

Después de esta primera revisión al documento de MesoSystems, el primer esfuerzo se centró en tratar de ubicar a los autores de dicho trabajo y así poder establecer más información acerca del diseño y construcción de la unidad MesoStill. A pesar de los múltiples esfuerzos y la gran cantidad de correos que se enviaron, las respuestas obtenidas por las personas contactadas fueron las siguientes:

“We are unable to help you with this request”

Julie Bazzel, Mesosystems

“Sorry, but any information on this topic must come directly from the authors. Unfortunately, we have no way of accelerating their response to you.”

Steve Wax, DARPA

Ante tantas negativas, se decidió no insistir en obtener más información y se llegó a la conclusión que estas empresas no podían brindar información debido a que la obtención del MesoStill fue el resultado de un trabajo de MesoSystems junto con la DARPA (Agencia de Proyectos Avanzados en Defensa Avanzada, siglas en inglés) y el Departamento de Defensa de los Estados Unidos. Al trabajar con este tipo de instituciones, el resultado de la investigación se convirtió en un proyecto de mucho cuidado, lo cual hacía que la información fuera muy difícil de obtener.

Así que iniciamos un trabajo a partir de unas consideraciones generales, como la implementación de una superficie extendida (intercambiador con aletas) necesario para el calentamiento de la unidad, la presencia de diferentes cámaras de almacenamiento de agua, un diagrama de flujo básico de la unidad (ver Figura 2-2 **Diagrama de flujo básico de la unidad MesoStill** Figura 2-2) y el uso de una estufa tipo camping como fuente de calentamiento principal en la unidad.

2.2 Geometría de la Unidad

Se diseñó una geometría básica basándose en las observaciones que se realizaron sobre la unidad MesoStill, llegando a la conclusión que la mejor geometría posible correspondía a la denominada de tubos concéntricos.

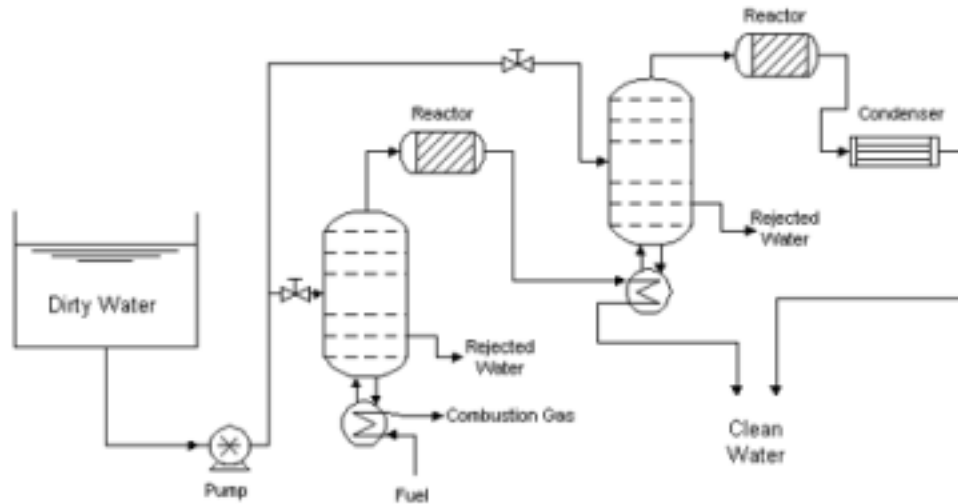


Figura 2-2 Diagrama de flujo básico de la unidad MesoStill

Tomando en cuenta las observaciones realizadas sobre la unidad MesoStill, se diseñaron 3 diferentes “cámaras” en cada uno de los efectos que se querían trabajar. Estas cámaras fueron denominadas en su orden:

- Cámara de ebullición
- Cámara de sobrellenado y
- Cámara de condensación.

La mejor forma en la que las tres cámaras podían estar en contacto era la estructura de “capas de cebolla” o concéntrica, en la que cada una de las cámaras estaba rodeada en su totalidad por la siguiente cámara. Es decir, la cámara de ebullición debía estar rodeada por la cámara de sobrellenado y ésta a su vez, estaría rodeada por la cámara de condensación. Otra de las ventajas que permitía esta estructura radicaba en el hecho que permitía agregar efectos en la misma forma, sin alterar la estructura principal de la unidad.

Teniendo en cuenta que al agregar cada efecto la unidad incrementaba su diámetro externo, se determinó que para poder tener una unidad de carácter portátil, el número de efectos “óptimo” en cuestión de tamaño era 2. Con este número de efectos se estableció un diámetro máximo que diera la pauta inicial para poder establecer el resto de las medidas en la unidad.

A continuación veremos más en detalle cada una de las partes que conforman la estructura básica de la unidad, las cuales podemos apreciar más fácilmente en la Figura 2-3.

2.2.1. Cilindro de calentamiento

El denominado cilindro de calentamiento es la parte de la estructura que está en contacto directo con la fuente de calentamiento. Se encuentra ubicado en la parte más interna o corazón de la unidad. Estructuralmente el cilindro de calentamiento no es más que una tubería abierta que atraviesa el centro de la unidad, permitiendo que el calor se transmita desde la fuente de calentamiento hasta las cámaras de cada uno de los efectos.

Para cumplir con los parámetros básicos de una destilación multiefecto, el calor que genere la fuente de calentamiento sólo será aprovechado en la destilación del primer efecto. Por tal razón, el tubo de calentamiento no se encuentra en contacto directo con el segundo efecto, el cual simplemente aprovechará el calor de condensación del vapor generado en el primer efecto.

2.2.2. Primer efecto

Como ya se había establecido previamente, el número de efectos que se utilizarían sería 2. Esto quiere decir que con la energía brindada por la fuente de calentamiento se realizaría la evaporación del agua almacenada en una primera etapa del equipo. Esta etapa es denominada primer efecto, y es la que a continuación se describirá.

En este primer efecto se deben llevar a cabo dos acciones principales, la evaporación del agua que queremos tratar y la condensación del vapor generado, lo cual nos permitirá obtener el destilado o agua producto. Para que se logren estas acciones en lugares diferentes del efecto, y así evitar contaminaciones en el agua producto, se utilizó la estructura ya ilustrada previamente.

2.2.2.1. Cámara de ebullición

Es en esta cámara en donde se lleva a cabo el proceso de evaporación del agua de entrada, la cual consideramos como salmuera para propósitos de este estudio.

Debido a que esta cámara es la que recibirá el calor de la fuente de calentamiento, se determinó que esta cámara de ebullición del primer efecto es la que debe estar en contacto directo con el tubo de calentamiento. Es decir, la cámara de ebullición es una cámara anular que rodea al tubo de calentamiento; a medida que el tubo aumente su temperatura debido a la llama brindada por la fuente de calentamiento, el agua almacenada en la cámara de ebullición del primer efecto, también aumentará su temperatura.

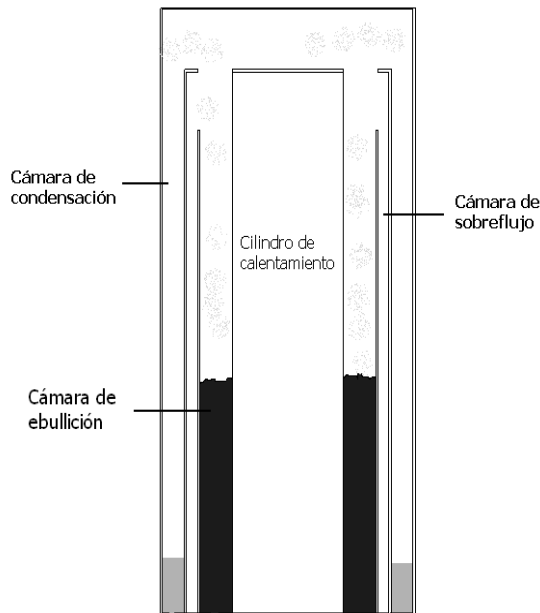


Figura 2-3 Esquema de la estructura del primer efecto

Una de las características principales que posee esta cámara radica en el hecho que la cámara se encuentra bajo una presión mayor a la atmosférica. A partir de la ecuación general de los gases ideales, y teniendo en cuenta la ley de Charles, se puede establecer que en un volumen constante a medida que aumentamos la presión, la temperatura también aumentará y así se cumplirá la relación establecida:

$$P * v = n * R * T \quad (1)$$

Aprovechando este concepto básico de un gas ideal, si se aumenta la presión en la cámara de ebullición, se aumentará la presión del vapor y así se logrará brindar un mayor calor de condensación en el siguiente efecto.

2.2.2.2. Cámara de condensación

La cámara de condensación es el lugar del efecto en el que se realiza un segundo cambio de fase para poder obtener nuevamente agua en fase líquida, con una cantidad de sólidos totales menor a la que tenía la salmuera inicial.

El vapor que se generó en la cámara de ebullición del primer efecto entra en contacto con una superficie fría, lo cual disminuye bruscamente la temperatura del vapor de agua y de esta manera cambia su fase gaseosa a la fase líquida. Vale la pena aclarar que esta cámara está aislada de la cámara de ebullición del mismo efecto, ya que de esta manera aseguramos que no haya contaminación del agua producto.

Obviamente debe haber alguna conexión entre esta cámara y la cámara de ebullición, ya que el vapor debe pasar de una cámara a otra. Para que fuera únicamente el vapor el que pasara de la cámara más interna a la más externa, la comunicación entre las dos se encuentra en la parte superior del efecto; esto se hizo con el objeto que el líquido se mantuviera en la cámara correspondiente, y al momento de existir una fase de vapor, éste gas pudiera pasar fácilmente de una cámara a otra.

2.2.2.3. Cámara de sobrellenado

Como se ha venido reiterando a lo largo de este documento, una de las principales preocupaciones a la hora de plantear cualquier tipo de estructura, es asegurar que no exista ninguna contaminación del agua producto por parte de la salmuera que pretendemos desalinizar.

Teniendo en mente esta consideración, se agregó una cámara adicional entre las cámaras de ebullición y condensación que tuviera dos objetivos principales dentro de la unidad: El primero de estos objetivos es dar a conocer al usuario el momento en que la cámara de ebullición está totalmente llena y el segundo objetivo es permitir una purga sin necesidad de detener el funcionamiento de la unidad.

Esta nueva cámara se encuentra conectada en su parte alta con la cámara de ebullición, permitiendo empezar a almacenar salmuera desde el momento en que la primera cámara (en donde ocurre la evaporación) se encuentra llena en su totalidad. El tamaño de la cámara de sobrellenado es un poco más pequeño con respecto a las dos cámaras anteriormente descritas; esto se hizo teniendo en cuenta que en la medida en la que cada una de las cámaras sea más grande, el diámetro de cada uno de los efectos aumentará.

2.2.3. Segundo efecto

La unidad presenta una segunda etapa o efecto que posee exactamente la misma estructura que el primer efecto, repitiendo las 3 mismas cámaras (ebullición, sobrellenado y condensado) pero con un diámetro un poco mayor debido a que el segundo efecto se localiza en un sitio más externo con respecto al cilindro de calentamiento. Si se hace un corte transversal sobre la unidad, se puede apreciar que el ancho de las cámaras dentro del primer efecto mantiene las mismas medidas en el segundo efecto.

En este segundo efecto ya no nos encontramos con un cilindro de calentamiento en contacto directo con la fuente de calentamiento; por el contrario, la cámara de ebullición de este segundo efecto está en contacto (aunque aislada completamente) con la cámara de condensación del primer efecto. De esta manera podemos asegurar el cumplimiento de la destilación multiefecto, ya que aprovechamos el calor de condensación (el

cual se libera al momento del segundo cambio de fase) de la primera etapa para poder calentar un segundo volumen de salmuera almacenado en el segundo efecto.

A diferencia del primer efecto, la cámara de ebullición en esta segunda etapa no está presionada sino que posee una presión igual a la atmosférica. Finalmente, tal y como sucede en el primer efecto, todas las cámaras tienen una tubería de salida, la cual se encuentra conectada a una válvula de paso, permitiendo controlar el flujo de agua en la unidad.

2.3 Funcionamiento de la unidad

El funcionamiento de la unidad se basó en su estructura básica, estableciendo un primer aprovechamiento de una unidad portátil que sea capaz de obtener agua potable a partir de cualquier fuente o reservorio de agua. La unidad funciona por lotes, es decir que se alimenta con una carga inicial y después de un tiempo aproximado de tres horas se debe hacer la purga tanto de la cámara de ebullición como de la cámara de condensación. El método a seguir para el correcto funcionamiento de la unidad es el que a continuación se enuncia.

Para el llenado de la unidad, la mejor estrategia a seguir es realizar la carga en un lugar nivelado y una vez se encuentren llenas las cámaras de ebullición de ambos efectos se puede montar sobre la fuente de calentamiento. La carga se hace por las válvulas que se encuentran en la parte superior de la tapa; estas dos válvulas se deben encontrar abiertas para poder cargar la unidad.

A la vez que se abren las válvulas para la carga se deben abrir las válvulas de salida de ambas cámaras de sobrellenado. Esto se hace con un objetivo claro, que el usuario conozca el momento exacto en que las cámaras de ebullición se encuentren llenas. Tan pronto como empieza a haber flujo de salmuera por las válvulas de salida de la cámara de sobrellenado, significa que la unidad está completamente cargada y se deben cerrar todas las válvulas. Una vez todas las válvulas se encuentren cerradas, se debe proceder a tapar la unidad; para esto, la tapa debe colocarse de tal manera que cada una de las letras sobre la tapa correspondan con la misma letra en cada uno de los broches.

De una forma muy cuidadosa, se debe llevar la unidad cargada a la fuente de calentamiento, la cual debe entrar en contacto únicamente con el cilindro de calentamiento para asegurar un buen funcionamiento de la unidad de destilación. Cuando la unidad ya se encuentra montada sobre la fuente de calentamiento, el único paso a seguir es encender la fuente de calentamiento y así esperar que se obtenga un volumen de destilado en cada una de las cámaras de condensación. Para que el usuario

identifique el momento de producción de destilado, la válvula de salida de agua producto del segundo efecto puede permanecer abierta.

Lo que sucede al interior de la unidad es bastante sencillo: Primero que todo el cilindro de calentamiento va adquiriendo altas temperaturas, y a su vez va cediendo calor al agua que se encuentra almacenada en la cámara de ebullición del primer efecto. Cuando este volumen de agua ha alcanzado una temperatura mayor a los 115 °C, éste empieza a evaporarse y a cambiar de fase (vale la pena recordar que ésta cámara se encuentra a una presión mayor a la atmosférica, por lo cual la temperatura de ebullición de la salmuera aumenta). El vapor que se crea debido al cambio de fase pasa a la cámara de condensación, la cual está a una temperatura menor porque se encuentra más alejada al cilindro de calentamiento que la cámara de ebullición.

El vapor empieza a ceder calor a la cámara de condensación y es obligado a cambiar a una fase líquida, la cual se almacenará en dicha cámara y se considerará agua producto. Este calor que liberó el vapor de agua es reaprovechado y se transmite a la cámara con la que se encuentra en contacto directo, la cual es la cámara de ebullición del segundo efecto. La gran cantidad de calor transmitida a este segundo volumen de agua almacenado hace que éste aumente su temperatura y llegue a los 100 °C aproximadamente; por lo tanto se genera una nueva cantidad de vapor que también pasará a una segunda cámara de condensación que se encuentra a una temperatura menor. El último cambio de temperatura hace que el vapor tenga un nuevo cambio de fase y se obtenga por segunda vez un agua producto, que es la que el usuario descubrirá al momento de ver flujo en la válvula de salida que se encuentra abierta.

Desde el primer momento que se empieza a notar destilado en la unidad, ésta puede permanecer en un funcionamiento continuo de aproximadamente 2 horas, y cuando haya transcurrido esta cantidad de tiempo, se puede realizar una purga sin necesidad de apagar la fuente de calentamiento. Para poder realizar esta purga es necesario vaciar primero las cámaras de condensación de ambos efectos, por lo que se deben abrir las dos válvulas correspondientes y almacenar el agua producto obtenida.

Una vez se vacía todo el destilado obtenido, se deben cerrar las válvulas y se debe cargar la unidad nuevamente hasta obtener flujo en las válvulas de sobrellenado. Este proceso se debe realizar primero en el efecto uno y después se procede a realizar la misma acción en el segundo efecto. Para realizar la carga simplemente se agrega agua por las válvulas de alimentación y se debe dejar que corra salmuera por la válvula de sobrellenado durante un tiempo aproximado de tres minutos. Esto con el fin de asegurar que se reemplazó la salmuera más concentrada que se tenía al comienzo, por una salmuera nueva.

CAPITULO 3

3. DISEÑO DE LA UNIDAD

3.1 Consideraciones Generales

Dentro de las consideraciones generales que se tuvieron en un comienzo se encuentran las siguientes:

- Primero que todo se estableció que la unidad debía cumplir ciertos términos de “portabilidad”, convirtiendo esta característica en la primordial a la hora de tener en cuenta al momento de tomar cualquier decisión en el diseño de la unidad.
- Aunque en un comienzo el objetivo de la investigación consistió en reproducir para Colombia el diseño de la unidad MesoStill desarrollada por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos de América, se tuvo en cuenta que para ser un primer paso en la aproximación a las tecnologías independientes, se debían arriesgar ciertas características de la unidad original. Entre estas características podemos contar la continuidad del proceso y el diseño del sistema de bombeo utilizado.
- Desde el principio de la investigación se estableció que la unidad debería funcionar bajo el esquema de una destilación multiefecto, por lo que la geometría propuesta se trabajó teniendo en cuenta que el calor liberado en el primer efecto debía ser implementado y usado en una segunda etapa.
- El proceso de investigación contaba conseguir más información que permitiera caracterizar de mejor manera las distintas propiedades que tenía la unidad MesoStill, pero desafortunadamente esta información no fue fácil de conseguir, por lo que la gran mayoría de las decisiones aquí tomadas no siguieron ningún objetivo planteado por los autores de la unidad MesoStill.

Teniendo en cuenta estas primeras especificaciones, se inició un proceso de diseño en el que se quería obtener una unidad de destilación de agua que permitiera potabilizar agua que viniera de cualquier fuente o reservorio.

3.2 Diseño preliminar

Como ya se estableció previamente, la primera etapa del proyecto fue el diseño básico de la unidad, y una de las primeras tareas consistió en definir la geometría del equipo; fue en esta etapa en la que se definió la

arquitectura básica y la forma en la que debía funcionar el equipo. La unidad consiste básicamente de 3 estructuras concéntricas denominadas cilindro de calentamiento, efecto 1 y efecto 2, numerándolas desde la parte más interna.

En un diseño preliminar se ideó que en el cilindro de calentamiento debía ir un intercambiador de calor, que estuviera en contacto directo con la llama de la fuente de calentamiento para así poder aumentar el área de calentamiento y por ende la velocidad de transferencia de calor. Después de analizar el fenómeno de ebullición, como ya veremos más adelante, se llegó a la conclusión que la mejor opción era tener la superficie extendida (aletas) en la parte interna de la unidad, más específicamente en la cámara de ebullición del primer efecto. El diseño preliminar que incluía el intercambiador de calor de cobre se puede apreciar en la Figura 3-1. En esta figura se pueden observar cómo se acoplan los diferentes efectos y el intercambiador de calor sobre una estructura central, que en este caso es el cilindro de calentamiento.

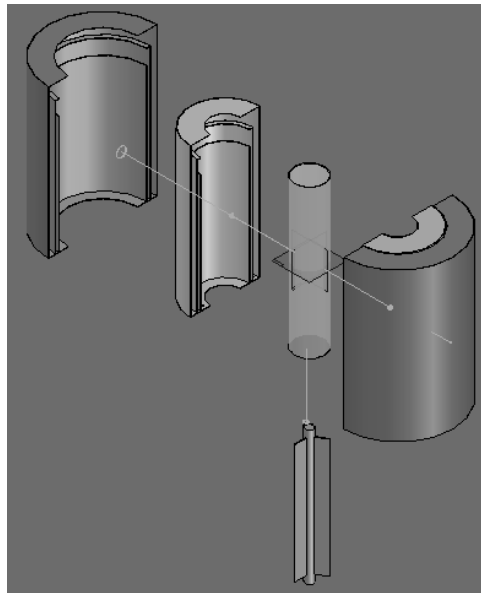


Figura 3-1 Vista explosionada del primer diseño elaborado

Vale la pena mencionar que en un principio el sentido de proporción del autor de este documento no era el más adecuado y se pensó que la unidad debía tener unas dimensiones aproximadas de 50 cm de diámetro y una altura de aproximadamente 60 cm. Fue con estas medidas que se hizo un primer bosquejo de la estructura de la unidad, y se estableció que a pesar de la exageración en las proporciones, la unidad cumplía con unos requisitos básicos de diseño como la presencia de los dos efectos, la presencia de las cámaras que se habían estipulado en la construcción del MesoStill, y una funcionalidad sin necesidad de servicios adicionales tales como energía eléctrica, líneas de vapor y agua, entre otras.

Una vez que el grupo de trabajo se percató del error cometido en las dimensiones iniciales de la unidad, se corrigieron las medidas de tal manera que la unidad no tuviera unas medidas mayores a los 30 cm en su diámetro más externo. Por lo tanto, fue esta medida la que permitió alterar los valores de la geometría previa (sin cambiar ninguna proporción) y así obtener el mismo tipo de unidad, pero con unas medidas más razonables.

Para poder hacer más visual la intención que se tenía con el diseño propuesto, la primera opción de diseño se llevó a una máquina de prototipo rápido en la que se elaboró un bosquejo de la intención de construcción de la unidad. Con este primer prototipo, se pudo plantear de una mejor manera la intención total del diseño y se pudo hacer que el diseño fuera más fácil de entender tanto por el equipo de trabajo como por la persona que debía construir la unidad.



Figura 3-2⁹ Máquina de prototipo rápido



Figura 3-3 Prototipo del diseño planteado

Aun que la unidad ya presentaba una estructura definida y las medidas estaban dentro de un margen que le brindaba “portabilidad” al equipo, aún era necesario establecer ciertos parámetros que aseguraran el buen funcionamiento de la unidad. Es por tal motivo que se hizo necesario tener en cuenta la cantidad de energía que era capaz de brindar nuestra fuente de calentamiento, además del análisis del proceso de ebullición que debía suceder en el interior de la unidad.

⁹ Imagen tomada de la página web del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de los Andes. <http://mecanica.uniandes.edu.co>

3.3 Fuente de calentamiento

Al igual que la unidad, la fuente de calentamiento debía ser escogida de tal manera que cumpliera ciertas características siendo la más importante la independencia y la “portabilidad” que tuviera. Es por esta razón que el primer sitio en el que se pensó adquirir la fuente de calentamiento era una tienda de aventura, en la que se vendieran accesorios para camping ya actividades denominadas de aventura.

Tal y como se esperaba el resultado fue muy bueno ya que existían gran variedad de accesorios que eran capaces de brindar energía a partir de una pequeña batería de gas. El primer criterio para poder escoger la fuente que se iba a utilizar en el proyecto fue el tipo de energía que era capaz de brindar el accesorio. Esto debido a que existían algunos accesorios que aunque también podían generar llama, su objetivo principal era brindar energía lumínica y no brindaban suficiente energía calorífica para calentar agua.

Una vez establecido el tipo de accesorio (uno capaz de brindar suficiente energía calorífica), los demás criterios entraron en juego para poder hacer una buena selección. Entre estos otros criterios se encuentran: potencia brindada por la llama, tiempo de autonomía, precio y tamaño. Teniendo en cuenta todos estos aspectos, se escogió como fuente de calentamiento apta para el proyecto la hornilla de gas *Turbo 270* de la marca Campingaz, empresa líder en la construcción y diseño de este tipo de accesorios.

Tabla 3-1 Características principales de la fuente de calentamiento

Característica	Valor numérico
Peso	270 g
Tiempo de ebullición ¹⁰	3 minutos
Autonomía	1 – 2 horas
Potencia	2500 W
Combustible	Butano - Propano

La unidad trabaja con una pequeña batería de gas, también construida por la misma empresa, lo cual aseguraba que el sistema hornillo-combustible era un sistema confiable al estar comprobado y recomendado por la empresa constructora. La batería que se adquirió tiene una capacidad de almacenamiento de 230 gr. del gas utilizado y posee una válvula de seguridad que le da más confiabilidad y facilidad de uso.

¹⁰ Este es el tiempo en el que según el proveedor, la hornilla es capaz de ebullición 1 litro de agua a presión atmosférica.



Figura 3-4 Detalle de la fuente de calentamiento

El único cambio que se le hizo a la fuente de calentamiento se ubicó en los orificios de salida de la llama, ya que los orificios originales se taparon con una masilla epóxica y posteriormente se abrieron unos nuevos orificios en la parte central de la hornilla. Esto se hizo con el objetivo de localizar la llama únicamente en el cilindro de calentamiento, que es lo que se quería desde un comienzo. Los cambios se pueden apreciar claramente en la Figura 3-5.



ANTES



DESPUÉS

Figura 3-5 Cambios en la fuente de calentamiento

Teniendo las especificaciones de la fuente de calentamiento que se iba a usar en el proyecto, ya podíamos establecer un nuevo parámetro para poder diseñar los tamaños de la unidad de destilación. Para este objetivo se tuvo en cuenta el análisis del fenómeno de ebullición.

3.3.1. Transferencia de calor

Según Incropera, existen seis regímenes de ebullición: En el primer régimen, la temperatura de la superficie de calentamiento es tan sólo unos cuantos grados mayor que la del líquido saturado circundante, el cual en este caso es la salmuera que pretendemos evaporar. Las corrientes de convección natural circulan alrededor de las porciones de líquido que se calienta y la evaporación se lleva a cabo en la superficie libre del líquido cuando éste alcanza ese punto.

Al aumentar la temperatura de la superficie de calentamiento, se puede observar que este fenómeno está acompañado de la formación de burbujas de vapor sobre dicha superficie. Estas burbujas se forman en ciertos lugares de la superficie donde se encuentran presentes los núcleos de las burbujas de vapor (espacios confinados de aire), las cuales se desprenden, alejándose de la superficie de calentamiento, y posteriormente se elevan y alcanzan la parte superior del líquido. Los regímenes II y III están asociados con el fenómeno denominado *ebullición nucleada*.

Más allá del máximo de la curva de ebullición (la cual estamos recorriendo a medida que aumenta la temperatura) empieza el régimen de *ebullición de transición*. Esta es la cuarta de la curva mencionada. En este régimen se forma una película de vapor alrededor de la superficie de calentamiento y algunas porciones de esta película se desprenden y se elevan, exponiendo brevemente una parte de la superficie que se sigue calentando. Este rompimiento de la película, así como su nueva formación y la naturaleza inestable de la misma es una característica propia del régimen de transición. Cuando este régimen se encuentra presente, la película de vapor presenta una considerable resistencia a la transferencia de calor, por lo que el flujo de calor disminuye.

Quando la temperatura de la superficie alcanza un valor aproximadamente de 200 °C por encima de la del líquido saturado, la película de vapor que circunda a la superficie se vuelve a estabilizar. Este es el quinto régimen, el cual se conoce bajo el nombre de régimen de *ebullición de película estable*. Finalmente, cuando las temperaturas superficiales alcanzan los 600 °C o mucho más altas que la del líquido saturado, la transferencia de energía radiante entra en juego y la curva de flujo calorífico se eleva una vez más. A esta última región se le designa con el número VI.

La curva de ebullición se puede apreciar en la Figura 3-6, mientras que una versión gráfica de las características de los diferentes regímenes se muestran en la Figura 3-7.

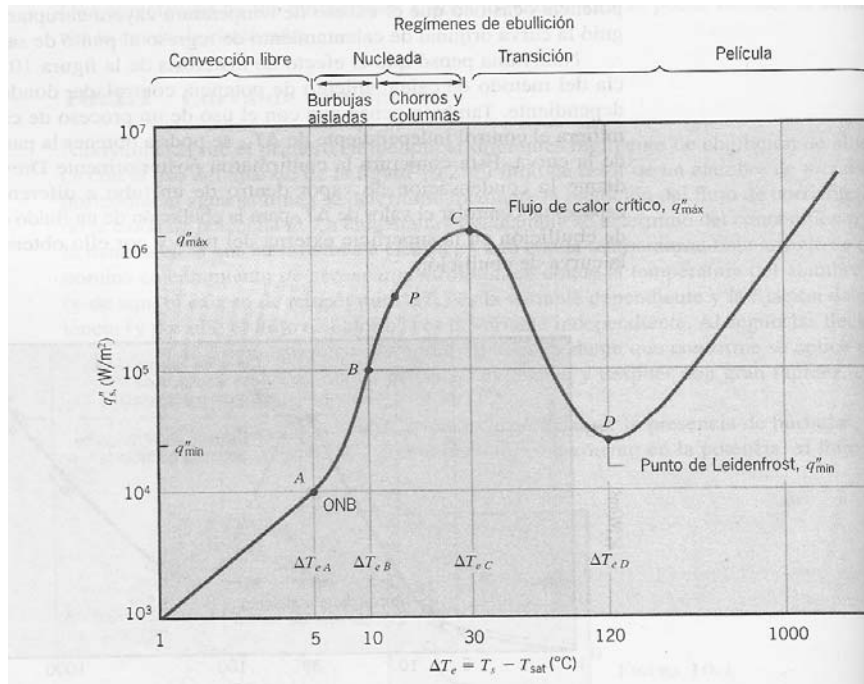


Figura 3-6 Curva de ebullición para agua a 1 atm

De acuerdo a la teoría, el mejor régimen bajo el cual podría trabajar la unidad es el régimen de burbujas aisladas (régimen de ebullición nucleada), ya que si avanzamos en la curva de ebullición, la formación de la película sobre la superficie entorpece una buena transferencia de calor. Por tal motivo, las acciones que se llevaron a cabo tuvieron en cuenta que según la potencia brindada por la fuente de calentamiento, la unidad de destilación debía trabajar en un punto que perteneciera al régimen ya establecido.

$$\text{Área} = \frac{\text{Potencia fuente calentamiento}}{q''} \quad (2)$$

Para el cálculo del área necesaria se utilizó la ecuación (2), y teniendo en cuenta un q'' aproximado a la región de la curva que corresponde al régimen de burbujas aisladas. El resultado de este cálculo arrojó un área de 0.029 m² en el cilindro de calentamiento, los cuales fueron distribuidos en un diámetro de 5 cm y una altura de 16 cm. Una vez conocido este dato, se realizó una última modificación a las medidas de la unidad de destilación, para así poder llevar los planos realizados directamente a construcción.

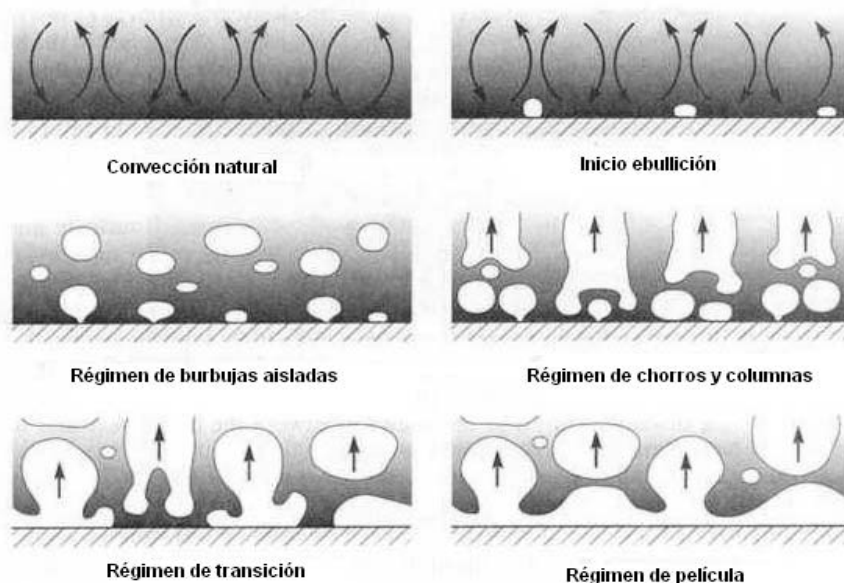


Figura 3-7¹¹ Regímenes de ebullición.

3.4 Construcción de la unidad

Los planos obtenidos tras la última modificación realizada, se pueden apreciar en el Anexo 1 de este documento. Estos fueron los planos que se llevaron a construcción en la empresa *Industrias Metálicas S.A.F.*, la cual se dedica a la fábrica, diseño y montaje de muebles en acero inoxidable para cocina.

Allí el señor Samuel Cruz se encargó de la construcción de la unidad de destilación, y según cotización, se trabajaría en una lámina de acero inoxidable calibre 16 referencia 304. El método de construcción fue el siguiente:

- Primero que todo se recortó una lámina circular, la cual serviría de base de la unidad de destilación. El calibre de esta lámina era mucho más grueso que el calibre 16, para así poder realizar soldadura sobre esta lámina sin llegar a atravesarla.
- El próximo paso consistía en soldar a dicha lámina, el que nosotros hemos denominado como cilindro de calentamiento. Este cilindro es una tubería de 2 pulgadas de diámetro que se soldó en la parte más central de la lámina.

¹¹ Imagen tomada y traducida de : <http://www.engr.iupui.edu/me/courses/me314lab/lab09.htm>

- Como ya teníamos una estructura inicial conformada por la lámina (base) y el cilindro de calentamiento, el siguiente paso consistía en el corte de las diferentes láminas que servirán de pared a cada una de las cámaras.
- Una vez cortadas las láminas, se procede a la soldadura sobre la lámina base de cada una de las cámaras establecidas. Vale la pena indicar que la soldadura se debe hacer iniciando en la cámara más interna (cámara de ebullición del primer efecto) y terminando en la cámara más externa (cámara de condensación del segundo efecto).
- Cuando ya se tiene la estructura principal de la unidad de destilación, se procede a la realización de la tapa, con un proceso de repujado y teniendo en cuenta las etapas ya construidas. Esta tapa debe contener cada uno de los correspondientes broches y cada uno de los orificios para su correspondiente accesorio.
- Mientras se culmina el proceso de la tapa, se procede al acople de las tuberías pertenecientes a las diferentes cámaras, junto con sus correspondientes accesorios. Además, al cuerpo de la unidad se deben agregar cada uno de los broches que cerrarán con la tapa y permitirán mantener la presión en el primer efecto de la unidad.

El resultado obtenido se puede apreciar en la Figura 3-8. El trabajo realizado superó las expectativas que se tenían y la unidad se encontraba lista para la realización de las pruebas de funcionamiento.



Vista superior



Vista frontal

Figura 3-8 Unidad de destilación construida.

CAPITULO 4

4. RESULTADOS OBTENIDOS

Para poder establecer que la unidad diseñada presentaba un sistema de funcionamiento similar al propuesto originalmente, se realizaron una serie de pruebas que a continuación se muestran.

4.1 Pruebas sobre la geometría

La primera de las pruebas se realizó con el objetivo de demostrar que efectivamente la geometría propuesta, en la cual existe un cilindro de calentamiento central, presenta una ventaja al momento de realizar una evaporación en un volumen de salmuera almacenado. Esta prueba también tenía otro objetivo el cual era conocer el calor que en realidad podía brindar la fuente de calentamiento y el porcentaje de rendimiento que podía llegar a tener el calentamiento a presión atmosférica.

El procedimiento era bastante sencillo, ya que en primera medida se evaporaba agua en un recipiente con la geometría típica (sin cilindro de calentamiento central) y midiendo temperaturas y tiempos, se podía establecer la potencia brindada por la fuente de calentamiento. Además, se repetía el mismo procedimiento con la unidad que tenía la geometría propuesta y se comparaban los resultados.

En las Tabla 4-1 y Tabla 4-2 se pueden apreciar los resultados obtenidos para la prueba con la geometría propuesta:

Tabla 4-1 Resultados de la prueba de calentamiento sin la geometría propuesta

Volumen H ₂ O	200	ml
Peso inicial estufa	632	gr
Temperatura inicial	18.4	°C
Distancia	5	cm
Apertura	Alta	
Peso final estufa	608.8	gr
t (s)	T (°C)	
0	18.4	
30	21	
60	21	
90	23.9	
150	28.8	
180	31.6	
210	32.1	

t (s)	T(°C)	
240	36.7	
270	39.9	
300	42.2	
330	43.8	
360	48.1	
390	51.5	
420	53.9	
450	54.5	
480	58.6	
510	61.5	
540	64	
570	64	
600	67.7	

Tabla 4-2 Resultados de la prueba de calentamiento con la geometría propuesta

Volumen H2O	1000	ml
Peso inicial estufa	772.34	gr
Temperatura inicial	21.5	°C
Apertura	Media	
Peso final estufa	757.46	gr
t (s)	T(°C)	
0	21.5	
30	27.6	
60	30.7	
90	33.4	
120	37	
150	39.8	
180	42.5	
210	45.1	
240	48.3	
270	51.5	
360	59.5	
390	61.4	
420	64	
480	67.8	
510	69.5	
540	71	
570	72.7	
600	74.1	
630	75.7	
660	76.8	
690	77.3	
720	77.4	

El montaje realizado se puede apreciar en la Figura 4-1.



Figura 4-1 Montaje de la prueba de geometría.

4.2 Evaluación coeficiente de convección

Para realizar el cálculo del coeficiente de convección de la unidad se estableció un montaje muy similar al que ya se había realizado previamente, pero esta vez se permitió una evaporación completa del volumen almacenado y además se agregaron datos de medición como la temperatura de la pared, temperatura de la llama y la temperatura de la pared sumergida.

Los resultados obtenidos con este montaje se muestran en la Tabla 4-3.

Tabla 4-3 Resultados en la determinación del coeficiente de convección

Volumen H ₂ O	1000	ml	
Peso inicial estufa	755.34	g	
Apertura	Media		
Peso final estufa	736.57	g	
t (s)	Tagua (°C)	Tpared (°C)	T pared sumergida (°C)
0	20.8	20.6	19.7

30	25	36.5	30.8
t (s)	Tagua (°C)	Tpared (°C)	T pared sumergida (°C)
60	33.2	39.2	34.9
90	36.6	41.8	39.6
120	41.5	43.9	43.6
150	43.3	46	47.7
180	48.5	46.8	50.9
210	50.9	48.5	54.5
240	54.2	49.8	58.0
270	57.5	51.2	61.4
300	60.8	51.1	64.1
330	63.9	51.4	67
360	66.8	54.3	69.9
390	69.7	54.2	73
420	72.9	55	76
450	75.1	57.5	77.2
480	77.5	59.3	79.1
510	79.4	56	80.7
540	81.1	59	81.9
570	83.5	54.8	83.5
600	86.1	59.6	85.5
630	87.4	58.6	87.3
660	88.3	62.3	88.3
690	88.9	60.8	88.7
720	89.2	58.2	89
750	89.5	55.1	89.2
780	89.9	56.5	89.7
810	90.3	58.4	89.7
840	90.2	60.2	89.6
870	90.4	65	89.7
900	90.5	70.4	89.7
930	90.4	65.5	89.7
960	90.4		89.7
990	90.4	66.3	89.7
1020	90.4		89.7
1050	90.4		89.7
1080	90.4		89.7
1110	90.1	69	89.5

4.3 Pruebas de salinidad

Esta prueba se convirtió en la prueba más importante de todas, ya que ésta demuestra el verdadero potencial de la unidad y es la que permitiría determinar si el objetivo que se planteó desde un comienzo se cumpliría o no.

Para la prueba se prepararon distintas muestras de salmuera, tratando de simular el agua de mar, agregando sal simple de cocina a un cierto volumen de agua obtenida del acueducto de Bogotá. La salinidad que se pretendía simular era de 35 000 ppm (partes por millón¹²) y en todos los casos se obtuvo esta concentración. Para poder medir la concentración de sal, se utilizó un conductímetro que arrojaba el resultado en Siemens (unidad de conductividad), la cual podía ser correlacionada con la concentración de sal en el agua.

Como se aprecia en el montaje de la Figura 4-2, la unidad se dejaba en operación y tras un determinado tiempo (1 hora aproximadamente) se procedía a la toma de muestra de agua producto, y su posterior medición de conductividad.



Figura 4-2 Montaje de la prueba de salinidad.

Los resultados se muestran como un promedio de 5 diferentes pruebas que se hicieron a cada una de las aperturas de llama con las que se trabajó la unidad.

Tabla 4-4 Resultados de la prueba de salinidad con apertura de llama baja

Conductividad inicial	117 mS
Conductividad producto	1520 μ S
Producción¹³	1.5 ml / min

¹² Esta unidad de concentración equivale a la unidad mg/ Li

¹³ Los valores de producción enunciados se refieren a la velocidad de producción de destilado cuando la unidad ha alcanzado un estado estable.

Tabla 4-5 Resultados de la prueba de salinidad con apertura de llama alta

Conductividad inicial	105.4 mS
Conductividad producto	2.74 mS
Producción	3 ml / min

4.4 Análisis de gases

Como parte final del proceso de elaboración del equipo, se llevó a cabo una prueba de análisis de gases en la “chimenea” de la unidad. Este análisis se realizó para corroborar que se estaba realizando una buena combustión en la fuente de calentamiento, a pesar de las modificaciones que se le habían realizado a ésta desde un comienzo.

Este tipo de prueba se realizó con un equipo Testo 330, el cual estableció que para una apertura de llama alta el gas contenía una concentración promedio de 30 ppm de CO, compuesto que revela una combustión incompleta. En cuanto a una llama de apertura baja, el sensor detectó una cantidad de 17 ppm del mismo compuesto.



Figura 4-3 Montaje del análisis de gases realizado.

CAPITULO 5

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se obtuvo finalmente una unidad portátil de destilación de agua con las siguientes características:

Tabla 5-1 Características principales de la unidad de destilación

Característica	Valor numérico
Díámetro	25 cm
Altura	20 cm
Peso	8 Kg
Salinidad destilado	500 ppm
Capacidad	1.5 Li

Si se comparan los resultados obtenidos con la unidad MesoStill, se puede apreciar que existen parámetros que distan mucho de llegar a ser una verdadera solución para los problemas de agua potable, pero a la vez, este tipo de tecnología representa un gran avance en el desarrollo de equipos que no necesitan de servicios adicionales.

En cuanto a costos se refiere, la unidad ha tenido los siguientes rubros:

Tabla 5-2 Costos relacionados a la unidad de destilación

Concepto	Valor
Estufa	\$ 55 000
Cartucho de gas	\$ 18 500
Construcción unidad	\$ 410 000
Válvulas y accesorios	\$ 88 000
TOTAL	\$ 571 500

El costo de la fuente de calentamiento puede llegar a ser cambiado, ya que la unidad presenta una versatilidad frente al tipo de fuente de calentamiento que se quiera utilizar. En caso que el usuario cuente con otro tipo de fuente de calentamiento, el costo puede disminuir alrededor de \$73 000, lo que hace más interesante y adquisitiva la unidad. En un comienzo se puede establecer que la unidad tiene una vida útil de 5 años.

5.1 Pruebas sobre la geometría

Al momento de realizar la comparación de las dos distintas geometrías, es necesario establecer que los volúmenes con los que se trabajaron en

cada una de estas geometrías fueron diferentes. Por lo tanto los resultados se normalizaron para poder realizar una comparación más óptima con respecto a las curvas de calentamiento.

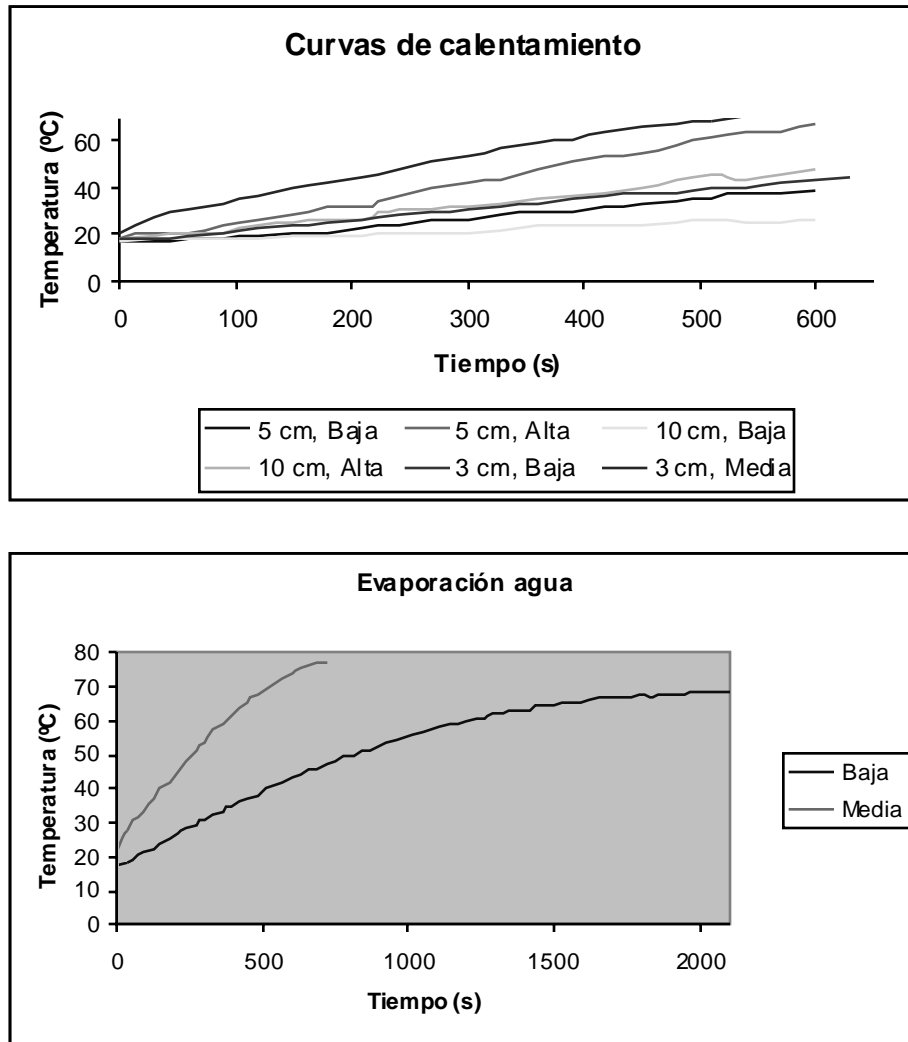


Figura 5-1 Curvas de calentamiento de agua para una geometría típica (arriba) y para la geometría propuesta (abajo).

Si se analiza detalladamente la Figura 5-1, se puede observar que los tiempos en los cuales se alcanzan temperaturas altas no son muy diferentes, pudiendo dar a entender que la geometría propuesta no representa una mejora frente a una geometría típica. Es por esta razón que se hizo necesaria la normalización de los datos obtenidos, y es con estos datos que se obtuvo la información de la Figura 5-2.

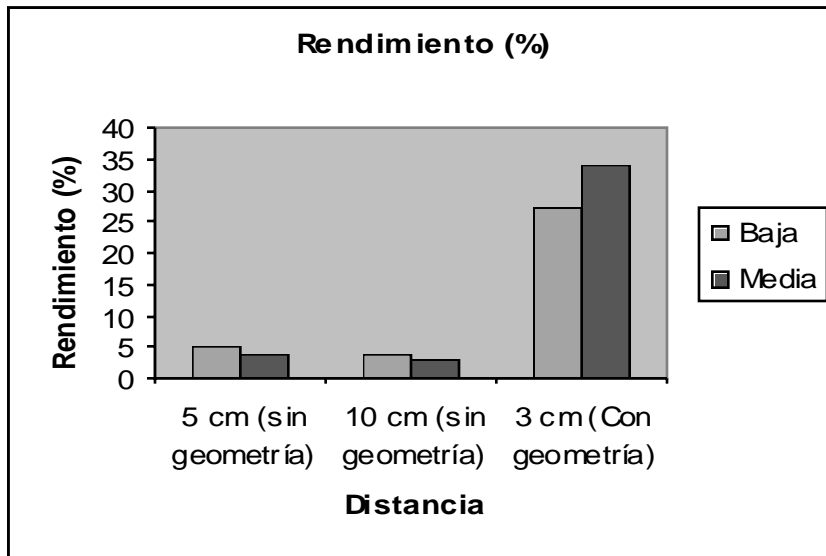


Figura 5-2 Rendimiento del calentamiento con distintas geometrías.

Observando esta nueva forma de presentar los datos, se puede apreciar que la geometría propuesta representa un rendimiento de hasta 7 veces mejor, con respecto a la geometría típica que no presenta un cilindro de calentamiento central.

5.2 Evaluación coeficiente de convección

Para realizar el cálculo del coeficiente de convección se tuvieron en cuenta dos fenómenos diferentes que suceden mientras se evapora el agua. El primero de ellos es el fenómeno de calentamiento sin evaporación y el segundo de ellos corresponde al tiempo en el que se evaporó agua. Cada uno de estos fenómenos se rige por una ecuación diferente y por lo tanto la transferencia de calor durante cada uno de ellos es diferente.

El calor transferido mientras el agua se calienta sin evaporarse está controlado por la ecuación (3), la cual depende de la masa de agua que se está calentando (m), el cambio en la temperatura y la capacidad calorífica del agua. Por otro lado, cuando ya se tiene en cuenta un cambio de fase como lo es la evaporación, la velocidad en la transferencia de calor se rige por la ecuación (4) que depende de parámetros como la masa evaporada de agua (m) y el calor latente de vaporización.

$$Q_{\text{calentamiento}} = m * C_p * \Delta T \quad (3)$$

$$Q_{\text{evaporación}} = m * h_{fg} \quad (4)$$

Los resultados obtenidos se pueden graficar y obtener una curva de calentamiento como la que se aprecia en la Figura 5-3. En esta gráfica podemos notar que los tiempos de cada uno de los fenómenos son diferentes; el fenómeno de calentamiento tiene una duración aproximada de 600 segundos, mientras que la evaporación (temperatura constante) dura alrededor de 510 segundos.

Con estos valores podemos calcular una velocidad de transferencia de calor asignadas a cada fenómeno, obteniendo los siguientes resultados:

$$q''_{\text{calentamiento}} = \frac{17 \text{ KJ}}{600 \text{ s}} \approx 28 \text{ W}$$

$$q''_{\text{evaporación}} = \frac{229 \text{ KJ}}{510 \text{ s}} \approx 450 \text{ W}$$

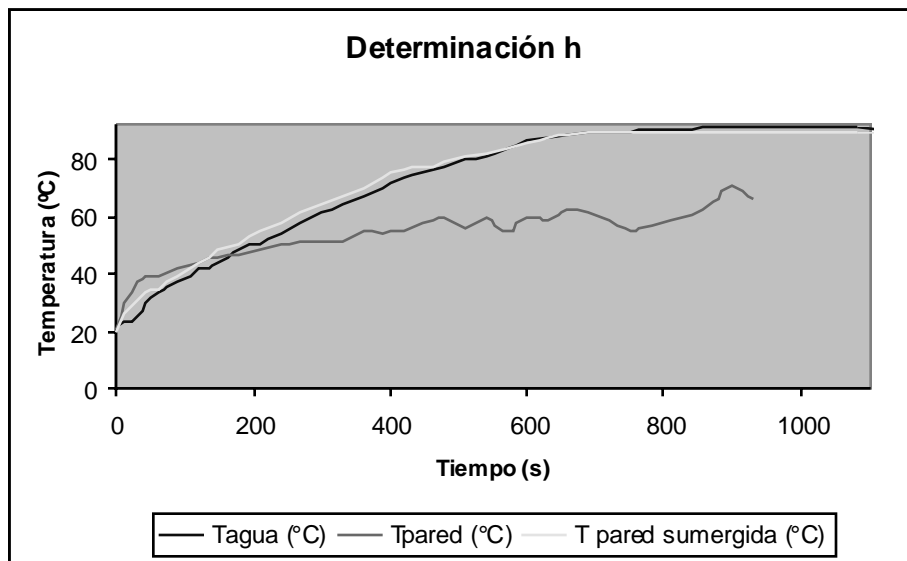


Figura 5-3 Curvas de calentamiento de la unidad de destilación

Por lo tanto el flujo total de calor, sumando ambos fenómenos, es de casi 478 W por unidad de área. Calculando el área y utilizando la relación de la ecuación (5), finalmente se puede establecer el coeficiente de convección total para la unidad de destilación portátil.

$$q'' = h * A * (T_{\text{llama}} - T_{\text{pared}}) \quad (5)$$

Como el área de calentamiento tiene un valor aproximado de $4 \times 10^{-4} \text{ m}^2$, y con una temperatura de llama promedio de $990 \text{ }^\circ\text{C}$, el valor calculado del coeficiente de convección corresponde a $1423 \text{ W/ m}^2 \text{ K}$.

5.3 Pruebas de salinidad

Como ya se estableció previamente, se hizo necesario el uso de un conductímetro que permitiera relacionar la conductividad de la solución con la concentración de cloruro de sodio presente en dicha solución. Por lo tanto se hizo primero una calibración de dicho instrumento para así calcular la correlación necesaria para el cálculo de la concentración

Según los datos obtenidos en la , la correlación entre conductividad y concentración corresponde a la mostrada en la ecuación (6).

$$\text{Concentración(ppm)} = \frac{\text{Conductividad(mS)} - 0.125}{0.0031} \quad (5)$$

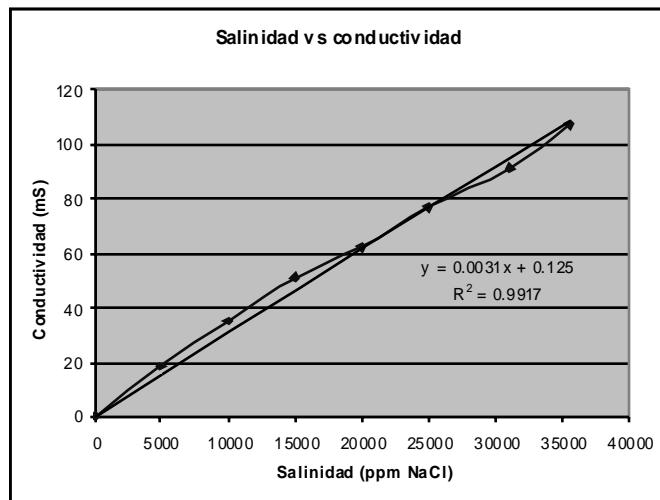


Figura 5-4 Curva de calibración del conductímetro

Teniendo en cuenta estos resultados de calibración se pudieron establecer las conductividades iniciales para cada uno de las aperturas de llama trabajadas, obteniendo una caracterización de funcionamiento de la unidad de destilación.

Tabla 5-3 Resultados de la prueba de salinidad con apertura de llama baja

Concentración inicial	37800 ppm
Concentración producto	450 ppm
Producción ¹⁴	1.5 ml / min
GOR	3.14 ml / gr Butano

¹⁴ Los valores de producción enunciados se refieren a la velocidad de producción de destilado cuando al unidad ha alcanzado un estado estable.

Tabla 5-4 Resultados de la prueba de salinidad con apertura de llama alta

Concentración inicial	34000 ppm
Concentración producto	850 ppm
Producción	3 ml / min
GOR	3.64 ml / gr Butano

Para cada una de las aperturas trabajadas también se calculó el denominado GOR, conociendo los volúmenes de destilado obtenidos y la cantidad de combustible que se consumió en cada una de las corridas de la unidad de destilación. Es este valor el que nos permite conocer qué tanta agua destilada podemos obtener por unidad de combustible utilizada.

Los valores que se obtuvieron en el desarrollo de este proyecto dan un paso alentador en el desarrollo de tecnologías independientes, ya que se demostró que es posible obtener agua con una calidad de sólidos disueltos totales aceptable y que puede llegar a convertirse en agua potable en el caso de necesitarse.

5.4 Análisis de gases

El objetivo de esta prueba final era tratar de establecer qué tan mala combustión se estaba realizando debido a las modificaciones que se hicieron en la fuente de calentamiento. Para tal fin se deseaba conocer la concentración de monóxido de carbono, CO, en los gases de combustión que se estaban generando en la unidad. Una vez conocido este parámetro, el siguiente paso era tratar de reducir esta concentración a un valor menor o aproximado a las 50 ppm

Observando los resultados se pudo notar que efectivamente se estaba realizando una muy buena combustión y que no había necesidad de variar el funcionamiento de la unidad que se venía utilizando. Por lo tanto no se hizo ninguna modificación debida a la combustión que venía ocurriendo en el cilindro de calentamiento.

CAPITULO 6

6. CONCLUSIONES

Como parte de las conclusiones de este trabajo de investigación, vale la pena recalcar ciertos asuntos referentes a la unidad obtenida, y que pueden ser evaluados en un futuro para poder obtener mejores resultados:

- El equipo que se construyó funcionó muy bien bajo la geometría propuesta (cámaras concéntricas). Es posible que existan otro tipo de geometrías que presenten unas velocidades de producción o GOR más elevados.
- Hay que seguir trabajando en la consecución de tasas de producción más altas que permitan que la unidad se establezca como una solución más apta para la obtención de agua potable.
- Una de las desventajas que puede llegar a presentar la unidad se encuentra en que funciona por lotes. Es posible diseñar un sistema de bombeo que permita tener una película en contacto con la superficie caliente, lo cual generaría mejores resultados que la ebullición de un almacenado de agua.
- En cuanto a los materiales de construcción también se pueden buscar nuevas alternativas, que permitan disminuir costos y así hacer más competitivo el uso de la unidad.

Con este trabajo de investigación se logró construir la unidad portátil capaz de obtener agua potable (1000 ppm) que funcionara con una fuente de calentamiento también portátil. Comparando los valores obtenidos de salinidad, se pudo establecer finalmente que el agua posee características de mejor "potabilidad" que la fuente de agua sobre la cual se estuvo trabajando.

A la vez, durante el desarrollo del proyecto se comprobó que la destilación multiefecto en realidad permite obtener mayor cantidad de destilado que una destilación simple. El aprovechamiento de un primer calor de condensación para el calentamiento de otro reservorio de agua es la característica más relevante para poder establecer una afirmación como ésta.

En cuanto a las características propias del proyecto, el sentido social que genera este trabajo de investigación es una de sus más grandes cualidades, permitiendo llevar soluciones a comunidades aisladas de un sistema de agua potable sin un costo muy elevado. Es muy posible poder crear un proceso en línea que produzca estas unidades en grandes cantidades para así poder solucionar los problemas de agua potable que están sufriendo miles de comunidades indígenas en Colombia y el mundo.

Otra de las características de este proyecto radica en su simplicidad, ya que también es muy posible que las comunidades en cuestión sean capaces de obtener unidades de destilación similares por medio de la adaptación de recipientes de cocina típicos.

Es obvio que la unidad obtenida en este trabajo no significa una solución única frente al problema que se está abordando. Este trabajo constituye un gran paso inicial en el desarrollo de tecnologías independientes en aras de la obtención de agua potable; y se convierte además, en un diseño base para otros trabajos que pretendan obtener mejores resultados que los obtenidos por los autores de este documento.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Binnie, Chris; Kimber, Martin; Smethurst, George. 2002. *H2O Basic Water Treatment*. 3ª Edición. Gran Bretaña. MPG Books.
- [2] CB (Committee to Review the Desalination and Water Purification Technology Roadmap). 2004. *Review of the Desalination and Water Purification Technology Roadmap*.
- [3] ORCE (Centro de Investigación de Recursos y Consumos Energéticos). 2001. *La desalación como alternativa al PHN*. España.
- [4] E- Nashar, Ali M. 2000. *Predicting part load performance of small MED evaporators – a simple simulation program and its experimental verification*. Desalination, Volume 130, Issue 3, Pag 217 – 234.
- [5] EPA (United States Environmental Protection Agency). 2002. *List of contaminants and their Maximum Contaminant Level*. [Disponible en línea]: <http://www.epa.gov/safewater/mcl.html#mcls>. [2005, Mayo 8].
- [6] Incropera, Frank P. 1999. *Fundamentos de transferencia de calor*. México ; Santafé de Bogotá : Prentice Hall, c1999, 4a edición.
- [7] Krishna, Hari J. *Introduction to Desalination Technologies*. Texas Water Development Board
- [8] López Mbrales, Alvaro. 1994. *Destilador de agua*. Proyecto de Grado. Santafé de Bogotá D.C.
- [9] Mbrin, O. J. 1993. *Design and operating comparison of MSF and MED systems*. Desalination, Volume 93, Issues 1-3, Agosto.
- [10] UNEP (United Nations Environment Program) International Environmental Technology Centre. 1997. *Source Book of Alternative Technologies for Freshwater Augmentation in Latin America and the Caribbean*.
- [11] Van der Bruggen, Bart. 2003. *Desalination by distillation and by reverse osmosis - trends towards the future*. Membrane Technology, Volume 2003, Issue 2, February.
- [12] WEDC (Water Engineering and Development Centre). 1993. *Desalination – Technical Brief*. [Disponible en línea]:

<http://www.lboro.ac.uk/well/resources/technical-briefs/40-desalination.pdf>.
[2005, Junio 21]

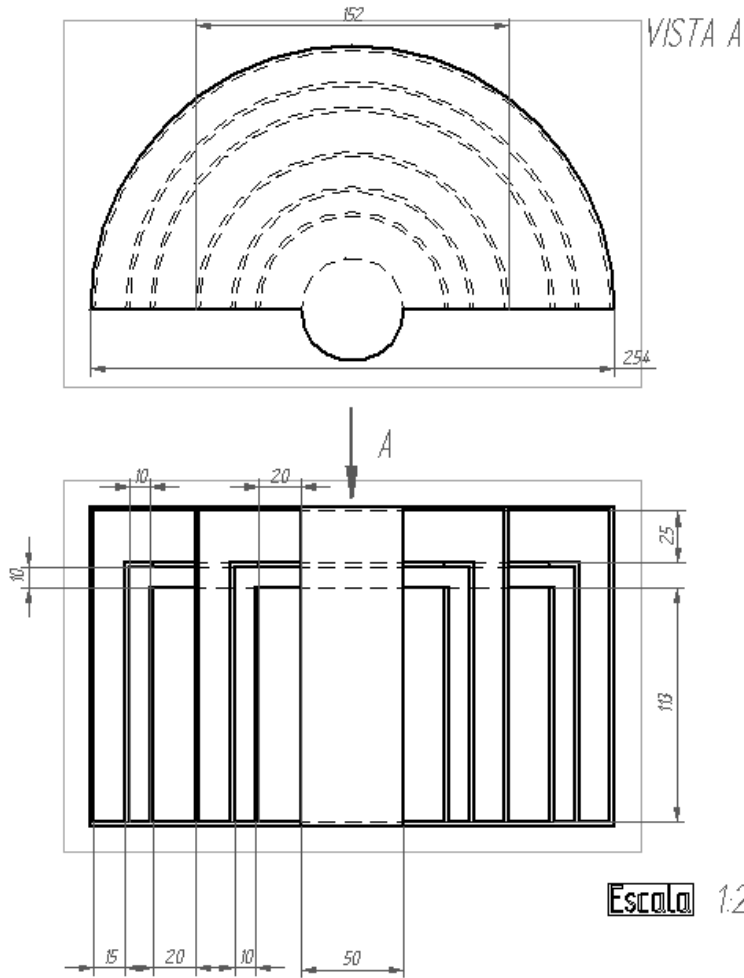
- [13] WHO (World Health Organization). 1984. *Guidelines for Drinking-Water Quality*. 1ª Edición. Geneva, Switzerland: World Health Organization.

7.1 Referencias en internet

- [14] <http://www.watertechonline.com/article.asp?IndexID=6634970>

ANEXO I

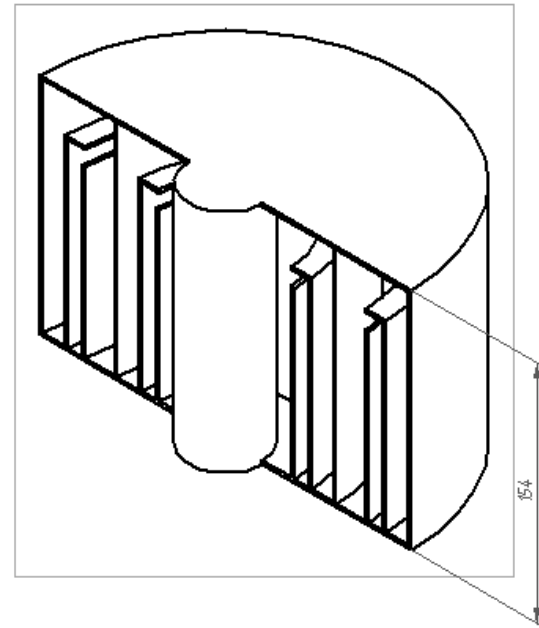
Planos De Construcción De La Unidad De Destilación



ESCALA 1:2

Todas las medidas se dan en milímetros

Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



Nombre	Fecha	SOLID EDGE EDS-PLM SOLUTIONS	
Dibujado Oscar Ardila	23 - marzo		
Comprobado		Título	
Aprobado 1	Rafael Beltrán	Unidad portátil de destilación de agua	
Aprobado 2		A3	Plano
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ±0.5 y ±1°		Escala	1:2
		Peso	
		Hoja 1 de 1	