



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

**TRANSFORMACIÓN DE AGUA SALADA EN AGUA DULCE UTILIZANDO
VACÍO Y CONDENSANDO POR COMPRESIÓN**

TESIS

**QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA**

PRESENTA: JUAN ANTONIO CRUZ ARCE



**DIRECCION GENERAL ACADEMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
COMITE DE EXAMENES PROFESIONALES**



29 ENERO 2013

CHAPINGO, ESTADO DE MÉXICO

**Transformación de agua salada en agua dulce utilizando vacío y
condensando por compresión**

Tesis realizada por Juan Antonio Cruz Arce bajo la dirección del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

DIRECTOR: _____



Dr. Federico Félix Hahn Schlam

ASESOR: _____



Dr. Irineo Lorenzo López Cruz

ASESOR: _____



M. C. Omar Reséndiz Cantera

**Transformación de agua salada en agua dulce utilizando vacío y
condensando por compresión**

El jurado que revisó y aprobó el examen de grado de Juan Antonio Cruz Arce
autor de la presente tesis de Maestría en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del
Agua.

DIRECTOR: _____



Dr. Federico Félix Hahn Schlam

ASESOR: _____



Dr. Irineo Lorenzo López Cruz

ASESOR: _____



M. C. Omar Reséndiz Cantera

DEDICATORIA

A **ME – XI – CO** (acento prosódico en la I)

Al lugar en el ombligo del maguey

Y a

IX - CHEL

que hace fértil nuestra tierra

AGRADECIMIENTOS

A **CHAPINGO** por la oportunidad que brinda a muchos jóvenes de México para estudiar el área más importante de la humanidad: la agricultura.

A **CONACYT** por impulsar la tecnología y apoyar no sólo a los mexicanos sino a todos los estudiantes del mundo.

DATOS BIOGRÁFICOS

1975	Nacido en Teotihuacan, Edo. de Mex.
1995-2000	Lic. Ingeniería Mecánica, Universidad de las Américas Puebla
2000-2007	Gerente de Producción y Metrología, Empresa Arce Tools, Puebla
2007- 2010	Profesor Universidad Politécnica de Puebla
2010-2012	Maestría Ingeniería Agrícola, Universidad Autónoma Chapingo

TRANSFORMACIÓN DE AGUA SALADA EN AGUA DULCE UTILIZANDO VACÍO Y CONDENSANDO POR COMPRESIÓN

TRANSFORMATION FROM SEA WATER INTO FRESH WATER USING VACUUM AND CONDENSING THROUGH COMPRESSION

Juan Antonio **Cruz Arce**¹ y Federico Félix **Hahm Schlam**²

La escasez de agua en la agricultura y en la vida diaria ha conducido a los seres humanos a la desalinización. Se construyó y probó un dispositivo que convierte agua salada en agua dulce usando vacío y condensando por compresión. El vapor saturado es succionado dentro de la camisa del condensador y el pistón comprime el vapor manteniendo la temperatura constante hasta llevarlo a su estado líquido sin aumentar la presión de vapor. Se realizaron los experimentos a presiones menores a la atmosférica (80 KPa en la ciudad de Texcoco) con un motor de 375 W obteniéndose como máximo dos litros en una hora y con un motor de 700 W se obtuvo tres litros a una presión de 125 KPa. Estos resultados comprueban la viabilidad de este método para la producción de agua para consumo humano y un análisis químico del agua demostró el cambio de fase que ocurrió en el proceso.

Palabras Clave: vacío, condensación por compresión

Shortages of water in agriculture and in daily life has led human beings to desalination. A device was built and tested and it is able to convert sea water into fresh water using vacuum and condensing through compression. The method consists in sucking saturated vapor into a chamber where a piston compresses the vapor until it reaches saturated liquid state, maintaining the temperature and pressure constant. The experiments were carried out at vapor pressures below atmospheric pressure (80 KPa in the city of Texcoco) using a motor of 375 W and two liter in one hour were obtained. With a motor of 750 W at a pressure of 125 Kpa, 3 liter were produced in half an hour. These results proved the viability of this process for the production of fresh water for daily human life. A chemical analysis was carried out demonstrating the phase change that took place during the process

Key Words: vacuum, condensation through compression

INDICE

1.-INTRODUCCIÓN	1
1.1.- Revisión de Literatura	2
1.2.- Características del estudio	7
2.- MATERIALES Y METODOLOGÍA	9
2.1.- Partes Principales	9
2.2.- Funcionamiento	11
2.3.- Calibración Manómetros y Controladores de temperatura	16
2.4.- Cálculo de parámetros iniciales para el sistema	17
3.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN	28
3.1.- Pruebas de un minuto	28
3.2.- Máximo tiempo de trabajo en experimentos uno y dos	36
3.3.- Energía que consume el dispositivo	41
3.4.- Calidad del Agua	43
4.- CONCLUSIONES	45
5.- BIBLIOGRAFÍA	46
6.- APÉNDICE	40

LISTA DE CUADROS

1. Flujo de Agua que debe entrar al evaporador	19
2. Flujo de Agua para enfriar el condensador y flujo de calor que se puede disipar	27
3. Comparación de los diferentes métodos de desalinización	43
4. Resultado del análisis químico	44

LISTA DE FIGURAS

1. Diagrama de flujo de dos sistemas de desalinización	6
2. Sistema con partes principales	9
3. Camisa de condensación con aletas de enfriamiento	10
4. Sistema utilizado para producir agua para consumo humano	12
5. Diagrama Temperatura - Volumen Específico	15
6. Calibración de manómetro electrónico	16
7. Medición de corriente utilizando un amperímetro de pinza	22
8. Aumento de presión cada 14 deci-segundos	29
9. Mediciones en última prueba	30
10. Trayectoria de compresión de vapor y salida del agua al colector	32
11. Balance de fuerzas en el pistón	33
12. Cantidad de Agua obtenida en un minuto	35
13. Temperatura Superficial Condensador y Agua de Tanque	37
14. Aumento de temperatura y presión dentro del Condensador	38
15. Comportamiento del vapor dentro del condensador	39
16. Máxima cantidad de agua obtenida hasta el paro del motor	40
17. Comparación de potencia teórica y real	41

1.- INTRODUCCIÓN

El clima en este siglo ha empezado a cambiar drásticamente debido al calentamiento del planeta provocado por el hombre. En todo el mundo se observan sequías e inundaciones extraordinarias. En México algunas partes de los Estados de Durango, Chihuahua y Sonora han presentado sequías que no se presentaban desde hace 60 años. Actualmente estos estados llevan casi dos años sin ninguna lluvia ocasionando la muerte de ganado y siembras de maíz principalmente. En Estados Unidos la situación es similar en estados del norte como Illinois, Iowa e Indiana. Las sequías han ocasionado pérdidas en la cosecha de maíz ocasionando un aumento en el precio de este grano para México y disminuyendo la producción de etanol de los Estados Unidos,

Para combatir la escasez de agua, en México se han creado diferentes métodos de desalinización. Se cuenta con 171 plantas desaladoras: 30% no operan y 53% del total son utilizadas para fines turísticos (Fuentes, 2002). En Quintana Roo existen plantas de ósmosis inversa, como en Xcalak cerca de Chetumal e Isla Contoy y prácticamente están abandonadas por falta de refacciones; además para el proceso más del 50% del equipo es de importación (Fuentes , 2002). Cuando se depende de tecnología extranjera siempre habrá problemas de refacciones además de que éstas serán normalmente caras.

1.2.- Revisión de Literatura

La destilación es el método más antiguo de todos y se realiza de la siguiente manera. Se calienta agua salada hasta que se evapore y este vapor se condensa cuando toca una superficie más fría. Este método se ha optimizado bastante creando los procesos de destilación multietapas y destilación “Flash”. La mayoría del agua que es desalinizada en el mundo es por este proceso y lo usa principalmente el país de Arabia Saudita. Este método es caro debido a que se necesita mucha energía para la evaporación y condensación. Puesto que en la mayoría de los países donde se usa este proceso son árabes y en ellos el petróleo es barato, este método les resulta el más conveniente.

La destilación solar simple llamada también destilación de caseta o de tipo invernadero, es el más económico de todos los procesos de desalinización. Es utilizado en muchos países del mundo como España, Cuba y México. Consiste en una caseta de material semitransparente, generalmente vidrio, que se coloca sobre una bandeja la cual tiene una delgada lámina de agua con sales. La radiación solar pasa a través del vidrio y calienta el agua. El fondo del estanque se pinta de color negro, originando que el agua alcance más altas temperaturas que el vidrio. El contenido de vapor de agua del aire interior es elevado y al entrar en contacto con la superficie de vidrio que esta mucho más fría, se produce la condensación del vapor. Este método puede obtener hasta 10 L m^{-2} en un día en el caso ideal (Fuentes, 2002).

En Almería, España se ha experimentado con reflectores parabólicos para evaporar el agua además de usar vacío. Se tiene una extensión de varias hectáreas donde se ha podido obtener hasta una cantidad de $72 \text{ m}^3 \text{ día}^{-1}$. El costo de producción de agua es de dos dólares por metro cúbico de agua. Es importante ver que el precio es bastante bajo ya que se trata de una producción de agua en grandes cantidades.

En otra parte del mar Mediterráneo (Libia) también se han usado espejos parabólicos para evaporar el agua así como un vacío de 25 kPa lo cual baja la temperatura de ebullición. En estos experimentos se han obtenido hasta 20 Lm^{-2} (Nassar, 2007). En Gaza, Palestina los invernaderos solares usan celdas solares para calentar el agua (Abu-Jabal, 2001) y producen grandes cantidades sin contaminar en absoluto al ambiente.

Un método comúnmente utilizado es el de osmosis inversa en el cual el agua es forzada con presión a cruzar una membrana y dejar atrás los compuestos que tiene en solución o suspensión (Correa, 2007). La fina naturaleza de las membranas de osmosis inversa obliga a considerar el acondicionamiento del agua a desalar para eliminar interferencias y permitir que el agua pase a través de ellas (Fariñas, 1999). El costo de la membrana es alto pero pueden obtenerse grandes cantidades de agua. La inversión inicial en un equipo de Osmosis Inversa también es alta y se requiere personal capacitado para su función y mantenimiento. La parte positiva de este proceso es que posee un

bajo consumo de energía comparado con otros procesos (Fritzmann et al., 2006). La única parte que consume electricidad son las bombas que proporcionan la presión (Wilf, 2007) y el costo del agua por este método es de tres dólares por metro cúbico (Peter-Varbanets et al., 2009).

El proceso de vapor de agua atmosférico extrae la humedad del ambiente para convertirla en agua y algunos investigadores han experimentado varias formas de este método (Wahlgren, 2001). Existen dos formas principales: (1) enfriando una superficie mediante métodos de refrigeración; (2) usar desecantes para absorber la humedad.

Mientras parece conveniente aprovechar la humedad que ya existe en el ambiente y el hecho que sólo se trata de deshumidificar el ambiente; existen algunas desventajas que acompañan a este concepto de extracción de agua. La humedad absoluta que se encuentra en el ambiente es muy baja en la mayoría de las partes del mundo, de ahí que para obtener grandes cantidades de agua se tendría que circular grandes cantidades de aire con una alta humedad relativa. Incluso en regiones costeras donde hace mucho calor y la humedad relativa es normalmente del 80%, la cantidad de agua que habría en un metro cúbico de aire sería de 20 ml aproximadamente, o sea una cantidad de agua demasiado pequeña.

La humidificación es el método que usa la naturaleza cuando el aire caliente pasa por la superficie del mar o por lugares en donde se rompen las olas y este aire se lleva esa agua en forma de pequeñas gotas y las evapora. En el trabajo

de Efat Chafik (2002) se calienta con ayuda de energía solar a una corriente de aire hasta una temperatura de 50 a 80 °C, en seguida se humidifica el aire inyectando agua de mar en la corriente de aire para después condensar el vapor contenido en el aire.

El aire puede circular por convección natural o por un ventilador el cual es movido por energía eléctrica, En la condensación también se necesita energía para enfriar alguna superficie y condensar el vapor. Algunos investigadores (Houcine et al., 2006) han estudiado el costo de este proceso y han encontrado que es alto.

Un sistema menos usado es el de compresión de vapor el cual comprime el vapor para aumentar su temperatura y presión. Este vapor pasa por un condensador que está a temperatura ambiente o menor y de esta manera se condensa el vapor. Este método necesita una superficie grande para la condensación (Dickey, 1994) por lo que no es muy utilizado a pequeñas escalas; aunque a escalas más grandes se obtienen hasta cinco metros cúbicos diarios (Adel, 2003).

Lara (2005) desarrolló un sistema avanzado y eficiente de compresión de vapor el cual usa un intercambiador de calor en forma de concha el cual aumenta la tasa de condensación incluso a diferencias de temperatura pequeñas entre el vapor y el agua de enfriamiento.

Dickey (1994) utiliza el método de condensación por compresión usando una bomba de vacío de anillo líquido. El vapor de agua es succionado por la bomba y al girar los álabes del rotor, la cámara donde está el vapor va reduciendo de tamaño de manera que se va comprimiendo. El anillo de la bomba es enfriado con agua salina por la parte de afuera y esto ocasiona un cambio de fase de vapor de agua a agua líquida. Las cantidades que obtuvo Dickey fueron pequeñas pero demuestran la viabilidad del principio de funcionamiento. Este último método ha sido poco investigado (Dickey, 1994) y por lo tanto es necesario llevar a cabo más experimentos como el del presente trabajo para demostrar su viabilidad.

A continuación se hace una aclaración entre el sistema conocido como desalinización por compresión de vapor y el sistema del presente trabajo donde se usa vacío y la condensación se da durante la compresión.

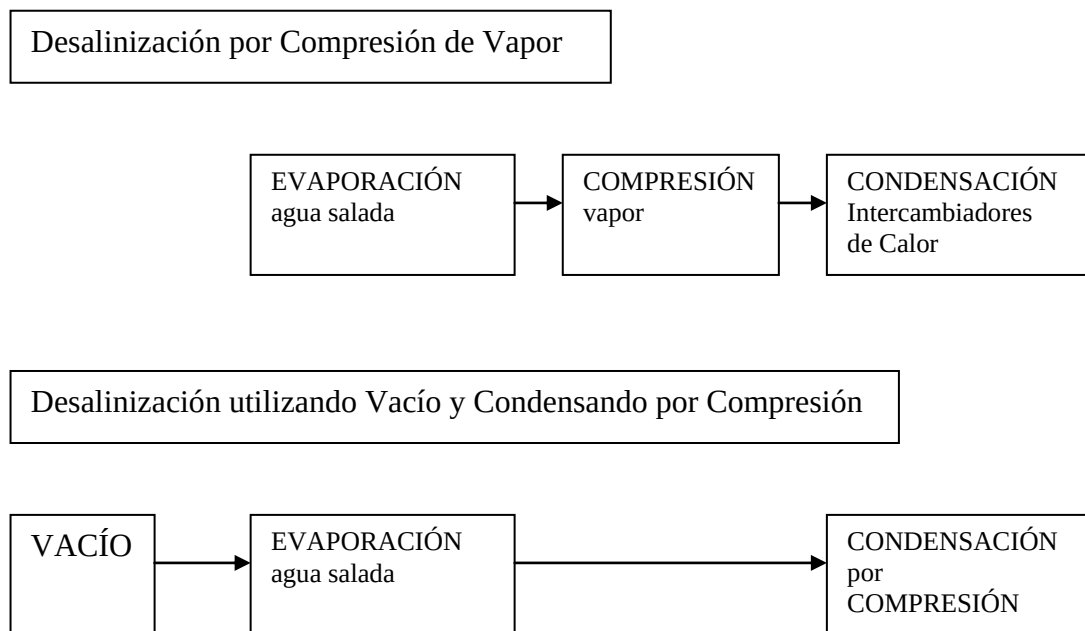


Figura 1. Diagrama de flujo de dos sistemas de desalinización

En la figura 1 se observa las tres etapas del proceso en la desalinización por compresión. La finalidad de la compresión es aumentar la temperatura del vapor y de esta forma al haber una mayor diferencia de temperatura con respecto al agua de enfriamiento habrá una mayor tasa de condensación. Durante la compresión también se aumenta la presión la cual proporcionara la energía para darle movimiento al vapor a través de los intercambiadores de calor.

El segundo sistema de la figura 1 es el que se estudia en este trabajo y tiene dos diferencias importantes con respecto al primer sistema. En primer lugar se realiza vacío en todo el sistema por medio de una bomba de vacío y se apaga la bomba. En seguida se realiza la evaporación como en el sistema de desalinización. Por tercer y último paso (diferente al del primer sistema de desalinización) se comprime el vapor enfriando el condensador por la parte de afuera para mantener la condensación isotérmica. Durante esta compresión termina hasta que todo el vapor ha pasado de su estado gaseoso su estado líquido obteniendo de esta forma la condensación.

1.1.- Características del estudio

Hipótesis

Obtener agua dulce a partir de agua salada por medio de un proceso que use vacío y condense por compresión.

Objetivos

General

Transformar agua salada en agua para consumo humano

Particulares:

- Diseñar un dispositivo capaz de convertir agua salada en agua dulce
- Construir un dispositivo
- Evaluación del funcionamiento del dispositivo
- Pruebas a diferentes presiones para obtener la mayor cantidad de agua
- Análisis de energía del dispositivo
- Análisis químico para verificar desalinización

Límites y Alcances

-El diseño del dispositivo será un prototipo que funcione bajo el principio propuesto.

-El dispositivo realizará la transformación de agua salada a agua dulce a pequeña escala.

2.- MATERIALES Y MÉTODOS

2.1.- Partes Principales

Los experimentos se llevaron a cabo en la ciudad de Texcoco la cual tiene una longitud de $98^{\circ} 39'$, una latitud de $19^{\circ} 23'$ y una altitud de 2240 msnm. Por lo tanto la presión atmosférica y la temperatura de ebullición del agua son de 80 kPa y de 94°C respectivamente. La operación del equipo puede ser explicada considerando 5 etapas: vacío (A), tanque alimentador de agua salada (B), evaporador (C), condensador (D) y el colector de agua dulce (E) (figura 2).

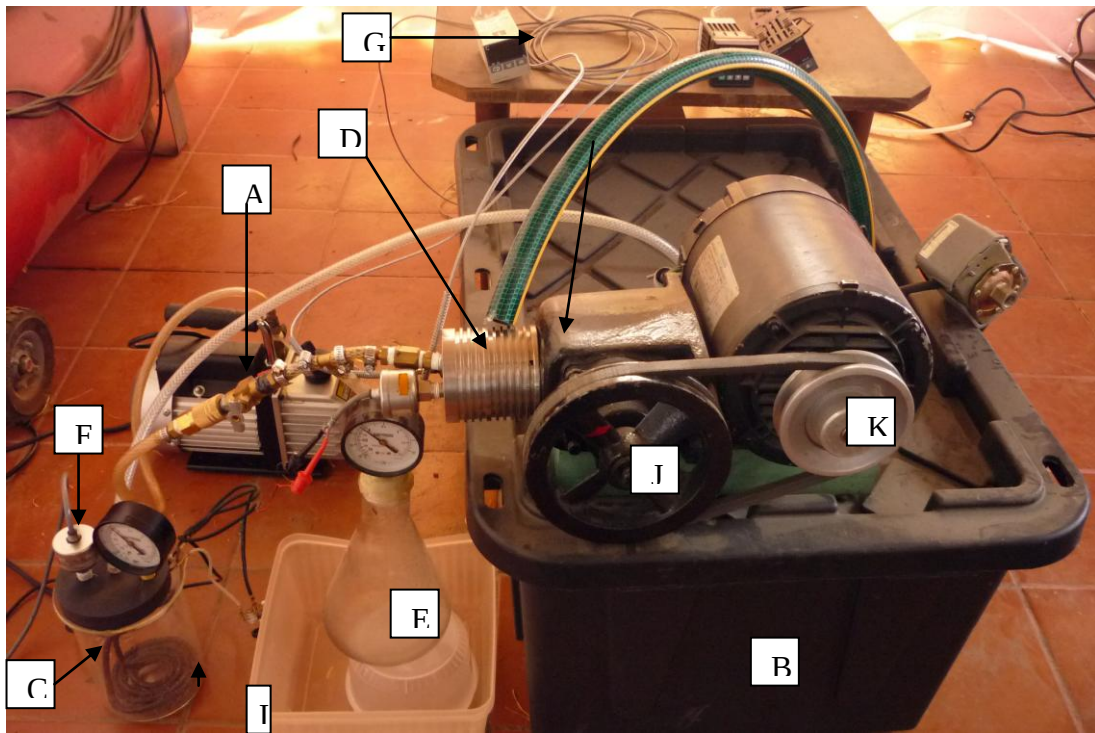


Figura 2. Sistema con partes principales

Todas estas etapas se encuentran conectadas por mangueras de 6.4 mm de diámetro que resisten una temperatura de hasta 115°C y conexiones de cobre. En el evaporador y condensador se localizan manómetros (F) con salida de 1 a 5 Vdc y que miden presiones absolutas entre 0 y 150 kPa. En cada etapa existen controladores (mod. E5C5-R1KJX, OMRON, Japón) con su respectivo termopar (G) para medir la temperatura del agua líquida o en forma de vapor en cada una de las etapas del proceso. También se tiene un controlador de temperatura en la resistencia (I) y otro para medir la temperatura de la camisa del condensador. En la etapa de condensación se tiene una camisa con ranuras (figura 3) para disipar más rápidamente el calor. La camisa es de acero inoxidable con diámetro interior de 5.06 cm, diámetro exterior de 7.6 cm y largo de 8 cm.



Figura 3. Camisa de condensación con aletas de enfriamiento

La compresión del vapor la realiza un pistón torneado a un diámetro de 2.5 cm en aluminio con dos ranuras para dos anillos de silicón de 43 mm de diámetro interior y espesor de tres milímetros (mod. 6768, HAYE,USA) los cuales son especiales para agua y pueden operar a temperaturas no mayores a 120 °C. El

pistón es movido por un cigüeñal con polea (J) de 14 cm de diámetro la cual a su vez es movida por una polea (K) más pequeña con un diámetro de siete centímetros. Esta polea se encuentra sujeta a un motor (mod. 1MMOICANXX00202P, marca WEG, Brasil) de 1750 rpm, 120 VAC, 375 W, monofásico para el primer experimento y un motor (mod. 1MMOICANXX00402P, marca WEG, Brasil) de 3500 rpm, 120 Vac, 750 W, monofásico para el segundo experimento.

2.2.- Funcionamiento

En el primer paso la bomba de vacío se acciona y se extrae el aire del sistema hasta obtener en los manómetros una presión absoluta de 25 kPa que es la mínima presión que se puede obtener con una bomba de medio vacío. La manguera que se encuentra entre el condensador y colector se llena de agua (inicialmente en el colector) por efecto del vacío como se aprecia en la figura 4 en la parte de color negro del dibujo. En seguida se cierra la llave de aguja que se encuentra junto a la bomba de vacío y se apaga esta última.

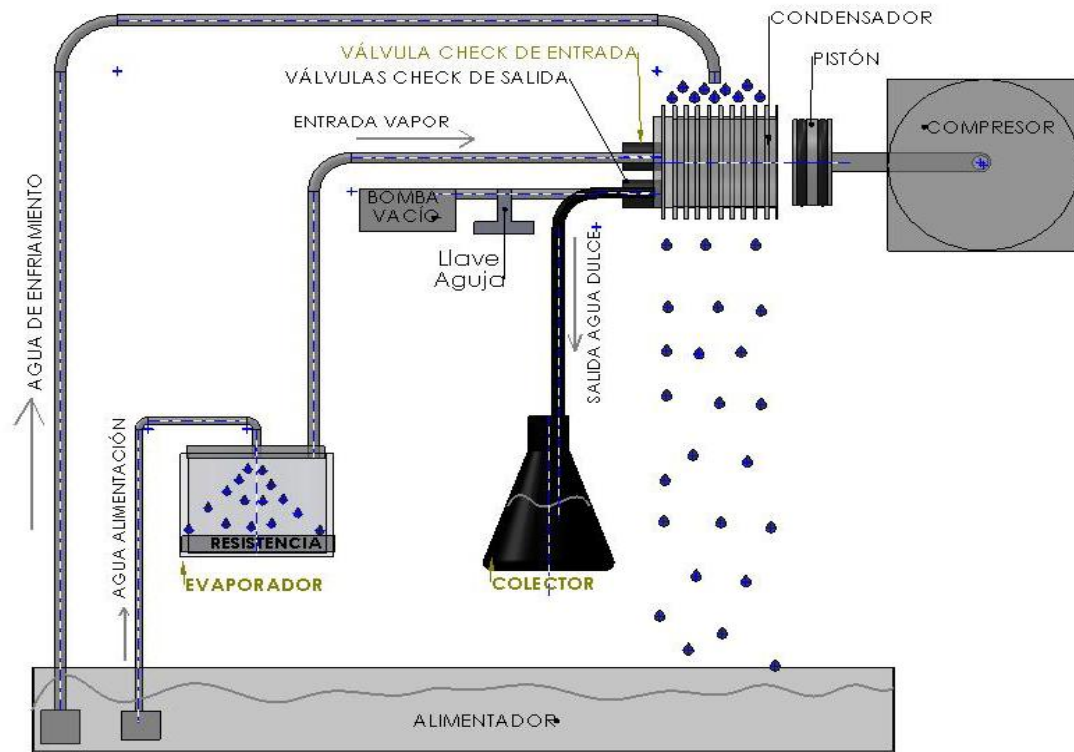


Figura 4. Sistema utilizado para producir agua para consumo humano

En seguida se acciona la bomba sumergible (mod WR-350, LAWN INDUSTRY, México) de seis watts y flujo máximo de 6 litros por minuto para alimentar el agua salada hacia el evaporador por medio de un nebulizador (mod. 567, Garden Heinz, China) que permitirá que el agua se evapore más rápido. La rapidez con la que el agua entra al evaporador se regula por medio de una perilla que tiene la bomba, lo cual es importante ya que si entra demasiada agua disminuirá la velocidad de evaporación. La potencia de la resistencia (mod. PL118-T, Lamex, México) de 2000 W es regulada también para evaporar el agua lo más rápido sin crear un aumento de presión en el evaporador. El agua que entra al evaporador y el flujo de vapor hacia el condensador deben estar sincronizados.

La cantidad de agua que entra a la camisa del condensador es igual al volumen de la cavidad dividida entre el volumen específico del vapor en el punto “a” (figura 5) o en el punto “a₁” según el punto sobre la línea de vapor saturado donde se encuentre el vapor. Con este valor de agua que entra al condensador se regula la bomba de alimentación para proveer un cinco por ciento arriba de esta cantidad para compensar por el agua que se queda en las paredes del vaso de precipitado. En la última sección de este capítulo se explica el cálculo del flujo de agua.

El agua salada que entra al evaporador, fue usada previamente para enfriar la camisa del compresor y por lo tanto esta agua posee una temperatura superior requiriéndose así menos energía para su evaporación. El evaporador es un vaso de precipitado el cual es calentado por una resistencia en la parte interior. Para saber la potencia teórica que debe proveer la resistencia se recurre a la fórmula de McGinnis (1969) la cual determina la transferencia en situaciones donde se nebuliza agua sobre superficies calientes. Estos cálculos se encuentran en la última sección de este capítulo.

En el momento en que las pequeñas partículas de agua nebulizada hacen contacto con la resistencia, éstas se evaporan instantáneamente. En este momento el vapor se encuentra en el punto “a” de la figura 4, donde se tiene solamente vapor en el vaso de precipitado.

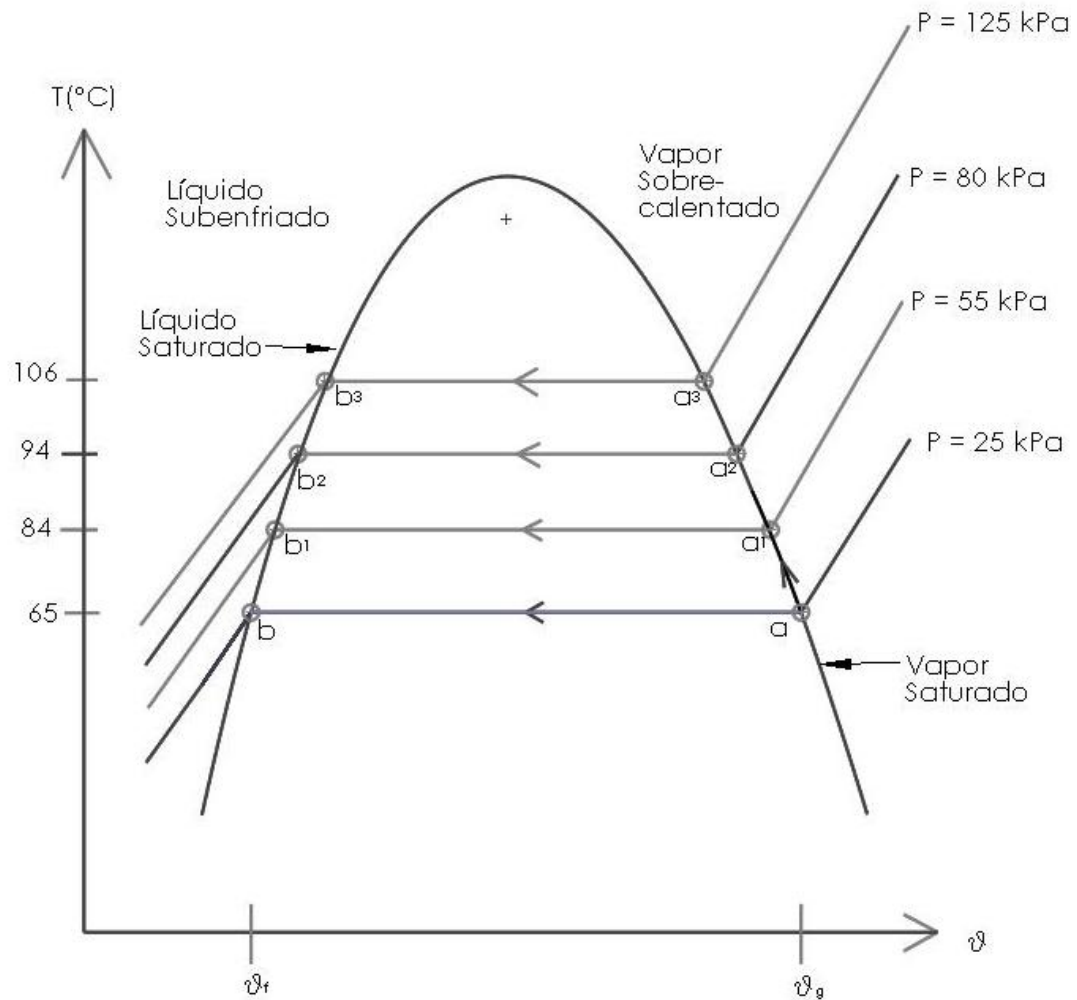


Figura 5. Diagrama Temperatura - Volumen Específico

Cuando el manómetro y el termómetro del evaporador marcan la presión y temperatura de saturación requerida para el punto “a”, se arranca el motor del condensador. Si se requiere por ejemplo que el vapor alcance el punto “a₁”, se espera a que se evapore más agua de manera que el volumen específico sea menor y suba el vapor por la trayectoria que indica la flecha del punto “a” a “a₁” (figura 5) y en este momento se prende el motor del condensador.

En el condensador el vapor es succionado cuando el pistón se retrae. La entrada del vapor a la camisa es regulada por una válvula check que permite sólo la entrada del fluido. En seguida, el pistón avanza comprimiendo el vapor hasta su estado líquido empezando de esta forma la etapa de condensación la cual se observa en la figura 5 del punto “a al “b” o del “a1” al “b1” dependiendo de la presión a la que se esté trabajando. Es importante mantener la temperatura del condensador constante con el objeto de que no suba la presión. Si esta aumenta el movimiento del pistón se vuelve más lento o puede detenerse. Para lograr esto, se enfría el condensador por la parte de afuera (figura 4) con el agua salada del tanque con una bomba sumergible (modelo AQUA60W, marca EVANS, México) de 100 W, flujo máximo de 100 L min^{-1} y perilla reguladora de flujo. De esta manera se aprovecha la temperatura que ha ganado el agua salada para entrar después al evaporador. Para conocer teóricamente el flujo de agua necesario para enfriar el condensador, en la última sección de este capítulo se muestra el procedimiento.

Se realizaron dos experimentos, en el primero se usó el motor de 375 W y en el segundo el de 750 W, en cada uno de ellos se realizaron pruebas aumentando la presión 10 kPa en cada una. Cada prueba se realizó por un lapso de un minuto hasta encontrar la prueba donde el motor ya no tenía la fuerza para arrancar. Una vez detectada la prueba donde se obtenía más agua, se dejaba trabajando el sistema con las condiciones respectivas por tiempos más prolongados.

2.3.- Calibración de Manómetros y Termómetros

Para la calibración se usa un datalogger (mod. LabPro, Vernier, USA) el cual es conectado a una computadora para visualizar los datos; el software empleado fue el Lab-PRO (Vernier, USA). Los manómetros son conectados a una corriente de nueve volts y se prosigue a conectarlos al datalogger para empezar la calibración. Se coloca el manómetro electrónico y un manómetro de carátula al vaso de precipitado (figura 6) el cual está sellado y con la bomba de vacío se extrae el aire. Cuando el manómetro de carátula marca 25 kPa de presión el voltaje de salida es de 0.3 V según el software Lab-PRO, se escribe la presión que marca el indicador de carátula. En seguida se realiza el mismo proceso con otra presión más grande conectando un compresor al vaso de precipitado para hacer pasar aire al interior hasta que el manómetro de carátula marque 130 kPa. En el software se muestra un voltaje de 4.2 V y se escribe la presión del manómetro. Con estos dos puntos el software crea una línea con una pendiente y con esto termina la calibración.

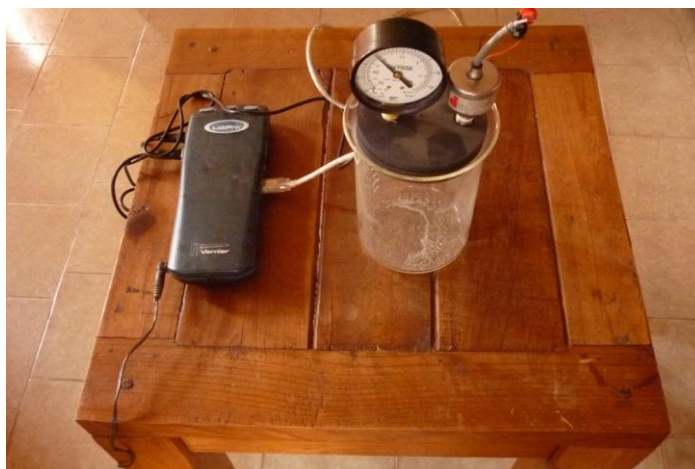


Figura 6. Calibración de manómetro electrónico

El procedimiento para calibrar los termopares es similar al proceso anterior sólo que como los termopares no se pueden conectar directamente al dattalogger se usa un convertidor (mod. RMTJ40BD, Shneider Electric, Indonesia) el cual requiere de un voltaje de alimentación de 9 V. Los termopares se conectan al convertidor para que éste de una señal de salida de 4 a 20 mA hacia el software.

2.4.- Cálculo de parámetros iniciales para el sistema

Flujo de Agua de agua de alimentación al evaporador

En la primera prueba se trabajo a $P = 25$ kPa y a esta presión el volumen específico de vapor saturado es $\vartheta_g = 6197 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$ de acuerdo a tablas termodinámicas del agua.

Radio interior condensador es $r = 2.53 \text{ cm}$ y su altura es $h = 4 \text{ cm}$

$$\text{Volumen Condensador} = V_{CP} = \pi r^2 h = (3.1416) (2.53 \text{ cm})^2 (4 \text{ cm}) = 80 \text{ cm}^3$$

Con base a este volumen se calcula la masa de vapor que puede contener la camisa.

Masa vapor de agua dentro Camisa = m

$$m = V_{CP} / \vartheta_g = (80 \text{ cm}^3) / (6197 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}) = 0.013 \text{ g}$$

rpm motor = 1750 rpm

diámetro polea motor = $\phi_{PM} = 7 \text{ cm}$ y diámetro polea condensador = $\phi_{PC} = 14 \text{ cm}$

$$\text{rpm condensador} / \text{rpm motor} = \phi_{PM} / \phi_{PC}$$

$$\text{rpm condensador} / 1750 \text{ rpm} = 7 / 14$$

rpm condensador = 1750 rpm (.5)

rpm compresor = 875 rpm

Flujo agua hacia evaporador = m°

$m^{\circ} = m \times \text{rpm condensador} = 0.013 \text{ g} \times 875 \text{ rpm}$

$m^{\circ} = 11 \text{ g min}^{-1} = 11 \text{ ml min}^{-1} = 1.8 \text{ E-4 kg s}^{-1}$

En el cuadro 1 se muestra la cantidad de agua que debe entrar al evaporador en cada prueba siguiendo el procedimiento anterior. Puesto que la presión de vapor es mayor en el orden creciente de las pruebas, el volumen específico va siendo cada vez menor ya que se tiene una mayor cantidad de vapor en el mismo volumen.

Cuadro 1. Flujo de Agua que debe entrar al evaporador

		Presión		Volumen		
	PRUE- BA	Vapor (kPa)	Temp Sat. (°C)	Esp. (cm ³ g ⁻¹)	m (g)	m° (g min ⁻¹)
EXP. 1	1	25	65	6197	0.013	11
	2	35	73	4526	0.018	15
	3	45	79	3576	0.022	20
	4	55	84	2963	0.027	24
	5	65	88	2534	0.032	28
	6	75	92	2217	0.036	32
EXP. 2	1	25	65	6197	0.013	23
	2	35	73	4526	0.018	31
	3	45	79	3576	0.022	39
	4	55	84	2963	0.027	47
	5	65	88	2534	0.032	55
	6	75	92	2217	0.036	63
	7	85	95	1972	0.041	71
	8	95	98	1777	0.045	79
	9	105	101	1618	0.049	87
	10	115	103	1486	0.054	94
	11	125	106	1375	0.058	102

Potencia de la Resistencia

La fórmula de McGinnis (1969) es:

$$Q = 1.83 \times 10^{-3} (r_L^2 V^2 d / r_{vf} s g_c)^{0.341} (r_L d^3 \lambda) \quad (1)$$

Donde:

Q = Transferencia de calor por gota

r_L = Densidad de gotas de líquido = 1000 kg m^{-3}

V = Componente normal de Velocidad de impacto = 2 m s^{-1}

Este valor se obtuvo midiendo con un cronómetro la velocidad a la que caen las gotas desde el nebulizador hasta el fondo del vaso de precipitado.

r_{vf} = Densidad del vapor a $T = (T_w + T_{sat})/2$ donde

T_w = Temperatura de la resistencia medida por un termopar = 100°C

T_{sat} = Temperatura a la cual se evapora el agua según su presión de vapor

De tablas termodinámicas del agua (en cualquier libro de termodinámica) se encuentra que la temperatura es de 65°C a una presión de vapor de 25 kPa .

Por lo tanto $T = (100 + 65)/2 = 82.5^\circ\text{C}$

Buscando en las mismas tablas termodinámicas del agua a la temperatura de saturación de 82.5°C se encuentra el volumen específico del vapor que es de $6200 \text{ cm}^3 \text{ gr}^{-1} = 6.2 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$. Si se divide la unidad entre este valor de volumen específico se obtiene la densidad de vapor de 0.161 kg m^{-3}

s = Tensión Superficial del agua = 0.066 N m^{-1}

g_c = Factor de conversión definido por la forma generalizada de la ecuación de Newton $F = (1/ g_c) m a$

donde: $g_c = 1 \text{ kg m} / \text{N s}^2$

d = Diámetro de la gota = 0.0001 m este valor se obtiene al dejar caer las gotas sobre una superficie y entonces se mide con un vernier el diámetro de una gota.

λ = Calor de evaporación modificado = $h_{fg} + C_{pv} (T_w - T_{sat}) / 2$

$$= 2346.2 \text{ kJ kg}^{-1} + 4 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1} (100 \text{ }^{\circ}\text{C} - 65 \text{ }^{\circ}\text{C}) / 2 = 2416.2 \text{ kJ kg}^{-1}$$

$$Q = 1.83 \times 10^{-3} \times [(1000)^2 \times (2)^2 \times (0.0001) / (0.161)(0.066)(1)]^{0.341} \\ \times [(1000) (0.0001)^3 (2416.2)]$$

$$Q = (1.83 \times 10^{-3}) \times (36.3) \times (2.41 \times 10^{-6})$$

$$Q = 1.6 \times 10^{-7} \text{ kJ gota}^{-1}$$

Tomando en cuenta el tamaño de una gota de agua de 0.0001 m, en un kilogramo de agua existen aproximadamente $2 \times 1000 \times 1000 \times 1000$ gotas de agua. Por lo tanto existe 2×10^9 gotas kg^{-1} y si este valor se multiplica por la Q anterior se obtendrá:

$$\text{Energía de evaporación} = Q \times 2 \times 10^9 \text{ gotas kg}^{-1} \\ = 1.6 \times 10^{-7} \text{ kJ gota}^{-1} \times 2 \times 10^9 \text{ gotas kg}^{-1} \\ = \mathbf{320 \text{ kJ kg}^{-1}}$$

Potencia Resistencia = $m^{\circ} \times \text{Energía de evaporación}$

$$= 1.8 \times 10^{-4} \text{ kg s}^{-1} \times 320 \text{ kJ kg}^{-1} \\ = 0.058 \text{ kJ s}^{-1} = 58 \text{ J s}^{-1} = \mathbf{58 \text{ W}}$$

Para cada prueba se ajustó la potencia de la resistencia necesaria para evaporar el agua empezando con el valor teórico obtenido. Para medir la

potencia real que se suministraba, se utilizó con un multímetro de pinza (fig. 7) para determinar la resistencia y la corriente y se realizó el cálculo $P = I^2 R$.



Figura 7. Medición de corriente utilizando un amperímetro de pinza

Flujo de calor que se sale del condensador

Haciendo un balance de las rapidezces de energía del condensador

Rapidez Energía entra al condensador = Rapidez Energía que sale del condensador

$$E^o_{entra} = E^o_{sale}$$

$$h_1 m^o + W^o = h_2 m^o + Q^o_{COND}$$

donde: h_1 = entalpía del vapor que entra al condensador (de tablas termodinámicas)

W^o = Rapidez de trabajo que realiza el motor para mover el pistón

h_2 = Entalpía del líquido saturado que sale (de tablas termodinámicas)

Q^o_{COND} = calor que sale del condensador

Despejando q se obtiene:

$$\begin{aligned}
 Q^{\circ}_{\text{COND}} &= (h_1 - h_2) \dot{m} + W^{\circ} \\
 &= h_{fg} \dot{m} + W^{\circ} \\
 &= (2346 \text{ kJ kg}^{-1}) (0.00018 \text{ kg s}^{-1}) + (0.375 \text{ kJ s}^{-1}) \\
 &= 0.422 \text{ kJ s}^{-1} + 0.375 \text{ kJ s}^{-1} \\
 &= 0.797 \text{ kJ s}^{-1}
 \end{aligned}$$

$$Q^{\circ}_{\text{COND}} = 797 \text{ W}$$

Flujo de calor que puede disipar el agua salada

Es importante conocer si el flujo de agua salada que circulará por el exterior del condensador será capaz de disipar el calor generado por la compresión del vapor y por la entalpía. La ecuación de Knudsen y Katz (1958) para un líquido en movimiento transversal a un tubo se muestra a continuación y se utiliza para conocer el coeficiente de transferencia de calor, realizándose el cálculo para la primera prueba.

$$h = C (\text{Re})^n \text{Pr}^{1/3} k / d \quad (2)$$

Donde: h = Coeficiente de transferencia de calor por convección

Re = Reynolds = $\rho d V / \mu$ donde:

ρ = densidad del agua = 980 kg m^{-3}

d = diámetro exterior del condensador = 0.075 m

V = Velocidad del flujo de agua

= Flujo Agua Enfriamiento / Área transversal manguera de Ø19mm

Flujo Agua Enfriamiento de acuerdo al manual de bomba = 5 L min^{-1}

$$= 4.5 \text{ E-4 m}^3 \text{ s}^{-1}$$

$$V = (4.5 \text{ E-4 m}^3 \text{ s}^{-1}) / (\pi \times .0095^2)$$

$$= 0.07 \text{ m s}^{-1}$$

$$\mu = \text{Viscosidad dinámica del agua} = 4.7 \times 10^{-4} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$$

$$\text{Re} = (980 \text{ kg m}^{-3} \times 0.075 \text{ m} \times 0.07 \text{ m s}^{-1}) / 4.71 \times 10^{-4} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$$

$$= 11491$$

Si Re se encuentra entre 40,000 y 400,000 las constantes son:

$$C = 0.0266 \quad n = 0.805 \quad (\text{Knudsen, 1958})$$

$$\text{Pr} = \text{Número de Prandtl} = C_p \mu / k$$

donde:

$$C_p = \text{calor específico del agua} = 4179 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$$

$$k = \text{conductividad térmica} = 0.6 \text{ W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$$

$$\text{Pr} = 4174 (0.00047) / .604 = 3.3$$

$$h = C (\text{Re})^n \text{Pr}^{1/3} k / d$$

$$h = 0.193 (62420)^{0.618} (3.3)^{1/3} (0.6 \text{ W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}) / 0.075 \text{ m}$$

$$h = 668 \text{ W m}^{-2}$$

Flujo de calor que puede disipar el agua salada = q_{AS}

$$q_{AS} = h A (T_w - T_\infty)$$

donde A = Área Exterior Condensador

$$= \text{Área tapa condensador} + \text{Área cilindro} + \text{Área Ranuras}$$

$$= (\pi \times 0.0375^2) + (\pi \times 0.075 \times 0.08) + 10 \pi (0.0375^2 - 0.03^2)$$

$$= 0.024 \text{ m}^2$$

Las siguientes temperaturas fueron obtenidas de los termopares colocados en la superficie exterior del condensador y en el tanque de agua salada.

T_w = Temperatura superficie exterior condensador para prueba uno = 100 °C

T_∞ = Temperatura del agua salada en el tanque = 20 °C

$$q_{AS} = h A (T_w - T_\infty)$$

$$q_{AS} = (668 \text{ W m}^{-2}) (0.024) (100-20)$$

$$q_{AS} = 1229 \text{ W}$$

En el cuadro 2 se puede observar que q_{AS} es mayor que q_{COND} y por lo tanto se puede decir que teóricamente si es posible disipar el calor generado por la compresión del vapor y por el rozamiento de los anillos de silicón con la superficie interior del condensador. Además se observa que q_{COND} va aumentando para las diferentes pruebas debido a que el flujo de vapor que entra al condensador es cada vez mayor. Igualmente q_{AS} va creciendo ya que se aumenta la velocidad del agua de enfriamiento.

Cuadro 2. Flujo de Agua para enfriar el condensador y flujo de calor que se puede disipar

Flujo Agua							
		Q°_{COND}	Enfriamiento	u_{∞}		h	q_{AS}
	PRUEBA	(W)	(L min⁻¹)	(ms⁻¹)	Re	(Wm⁻² °C⁻¹)	(W)
EXP 1	1	817	5	0.07	11491	668	1229
	2	975	10	0.15	22982	1025	1886
	3	1129	15	0.22	34472	1317	2423
	4	1280	20	0.29	45963	1614	2970
	5	1428	25	0.37	57454	1932	3555
	6	1573	30	0.44	68945	2237	4117
EXP. 2	1	1633	35	0.51	80436	2533	4661
	2	1949	40	0.59	91926	2820	5189
	3	2258	45	0.66	103417	3101	5706
	4	2560	50	0.73	114908	3375	6211
	5	2856	55	0.81	126399	3645	6706
	6	3146	60	0.88	137890	3909	7192
	7	3435	65	0.96	149380	4169	7671
	8	3719	70	1.03	160871	4425	8143
	9	4001	75	1.10	172362	4678	8608
	10	4278	80	1.18	183853	4928	9067
	11	4551	85	1.25	195344	5174	9520
	12	4826	90	1.32	206834	5418	9969

3.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1.- Pruebas de un minuto

Experimento uno

Se realizaron las pruebas por tiempo de un minuto con el fin de ver bajo que condiciones se obtiene mayor agua dulce. Se realizaron seis pruebas aumentando la presión 10 kPa en cada prueba hasta que a una presión de 75 kPa el motor no tuvo la fuerza para mover el pistón. Se registró la presión y la temperatura durante ese minuto. En todas las pruebas se registró un comportamiento de aumento de presión cuando el líquido saturado salía del condensador.

En la figura 8 se muestra la gráfica de la primera prueba. En eje de las abscisas se observa la escala en deci-segundos que fue la unidad como se registraron los datos con el datalogger Vernier. La razón para esta unidad es la siguiente.

Velocidad de la polea del pistón = 875 rpm

$$875 \text{ rev min}^{-1} (1 \text{ min} / 60 \text{ s}) = 14.5 \text{ rev s}^{-1}$$

Cada 14.5 s el pistón avanza para realizar la compresión del vapor. Los brincos de presión van de 26 kPa a 84 kPa aunque la temperatura se mantiene constante tanto en el condensador como en el colector debido al agua que enfría el condensador y no permite el aumento de la temperatura.

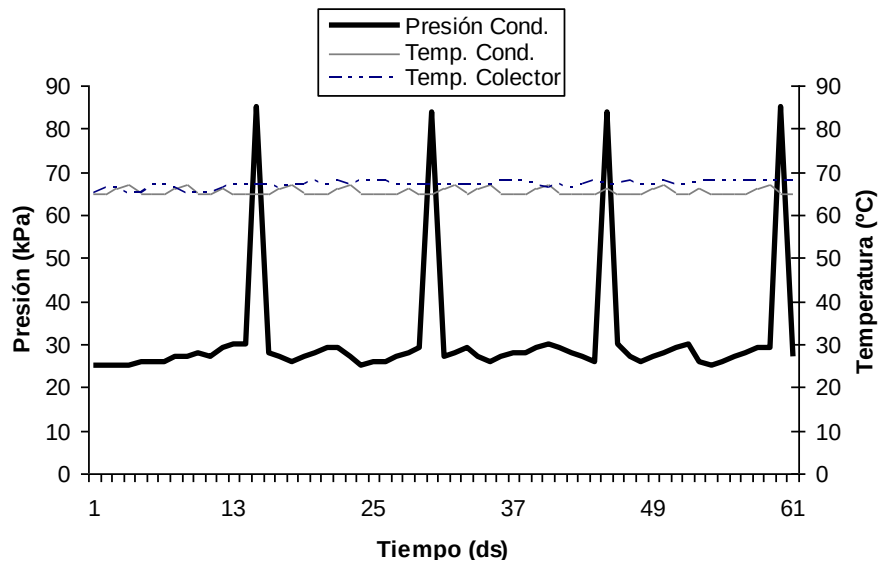


Figura 8. Aumento de presión cada 14 deci-segundos

Los resultados que se muestran en la figura 8 son sólo de 61 deci-segundos, pero el comportamiento se mantiene durante el tiempo de un minuto de la prueba y es igual en las demás pruebas aunque con brincos más pequeños.

Los picos en la presión se deben a que una vez que el pistón ha comprimido el vapor y éste se licua, la presión del líquido aumenta cuando va a salir del condensador y por lo tanto se requiere superar la presión atmosférica del agua que se encuentra en el colector. Además se observa también que el agua se mantiene a la misma temperatura de 65 °C cuando entra al colector.

Experimento dos

Los resultados en la última prueba del experimento dos se muestran en la figura 9. A diferencia del experimento uno, aquí no hubo brincos de presión puesto que la presión dentro del condensador es mayor que la presión en el colector la cual está a presión atmosférica. Se puede ver como la presión de 125 kPa

(medida por el manómetro en el condensador) y la temperatura de 106 °C (medida por el termopar en el condensador) en el condensador se mantienen prácticamente constantes durante la compresión en el condensador.

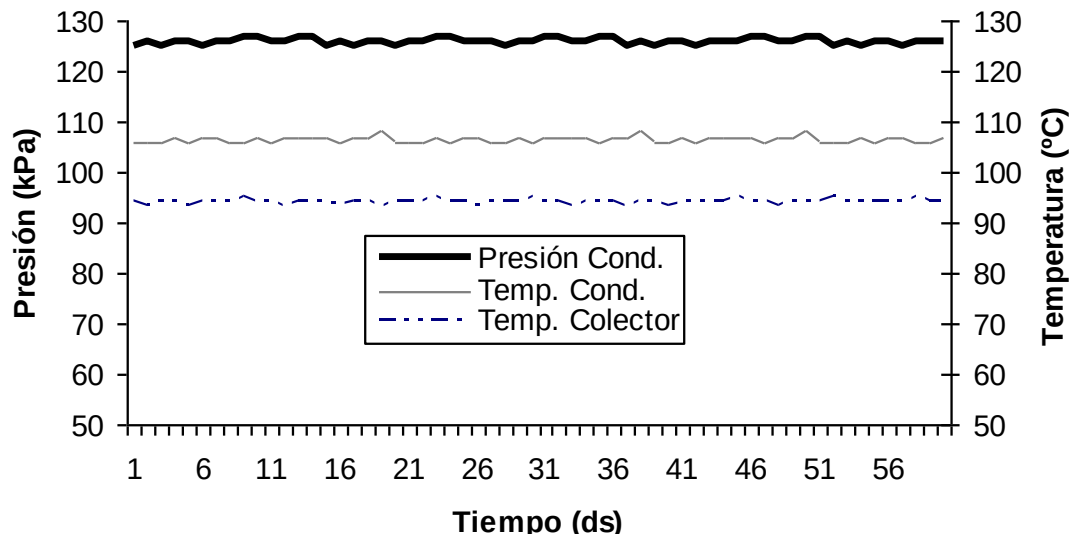


Figura 9. Mediciones en última prueba

Además se observa también que cuando el agua sale al colector su temperatura baja a 95 °C la cual es la temperatura a la que se encuentra el agua en el colector y que correspondiente a la presión de saturación de 80 kPa que es la presión atmosférica a la cual se encuentra el agua del colector.

Proceso de compresión en el condensador en un diagrama de temperatura contra volumen específico.

En base a las gráficas de la figura 9, mientras el vapor está siendo comprimido y la temperatura se mantiene constante. Este recorrido del vapor es del punto “a” al punto “b” o del punto “a₁” al punto “b₁” como se muestra en la figura 10. En el colector el agua está a presión atmosférica, por esta razón como se observa en la figura 10 a partir del punto “b” el agua continua hacia la izquierda

manteniendo la temperatura hasta llegar al punto “c”. Esto puede se puede corroborar con la figura 8 con los datos registrados que muestran la misma temperatura dentro del condensador y en el colector.

En las pruebas del segundo experimento la presión y la temperatura dentro del condensador se mantiene constante siguiendo el recorrido del punto “a3” al “b3” que se muestra en la figura 10. Cuando entra el agua líquida al colector la presión baja a la presión atmosférica del colector. Según las mediciones que se muestran en la figura 8 la temperatura baja de 106 °C a 95 °C. Este comportamiento se refleja en la figura 10 cuando el agua líquida pasa del punto b_3 al b_2 que corresponde a una disminución en el volumen específico de 1.046 kg m^{-3} a 1.038 kg m^{-3} (datos obtenidos de tablas termodinámicas a la presión de vapor indicada en la figura) respectivamente, lo cual representa una disminución en volumen específico menor al 1%.

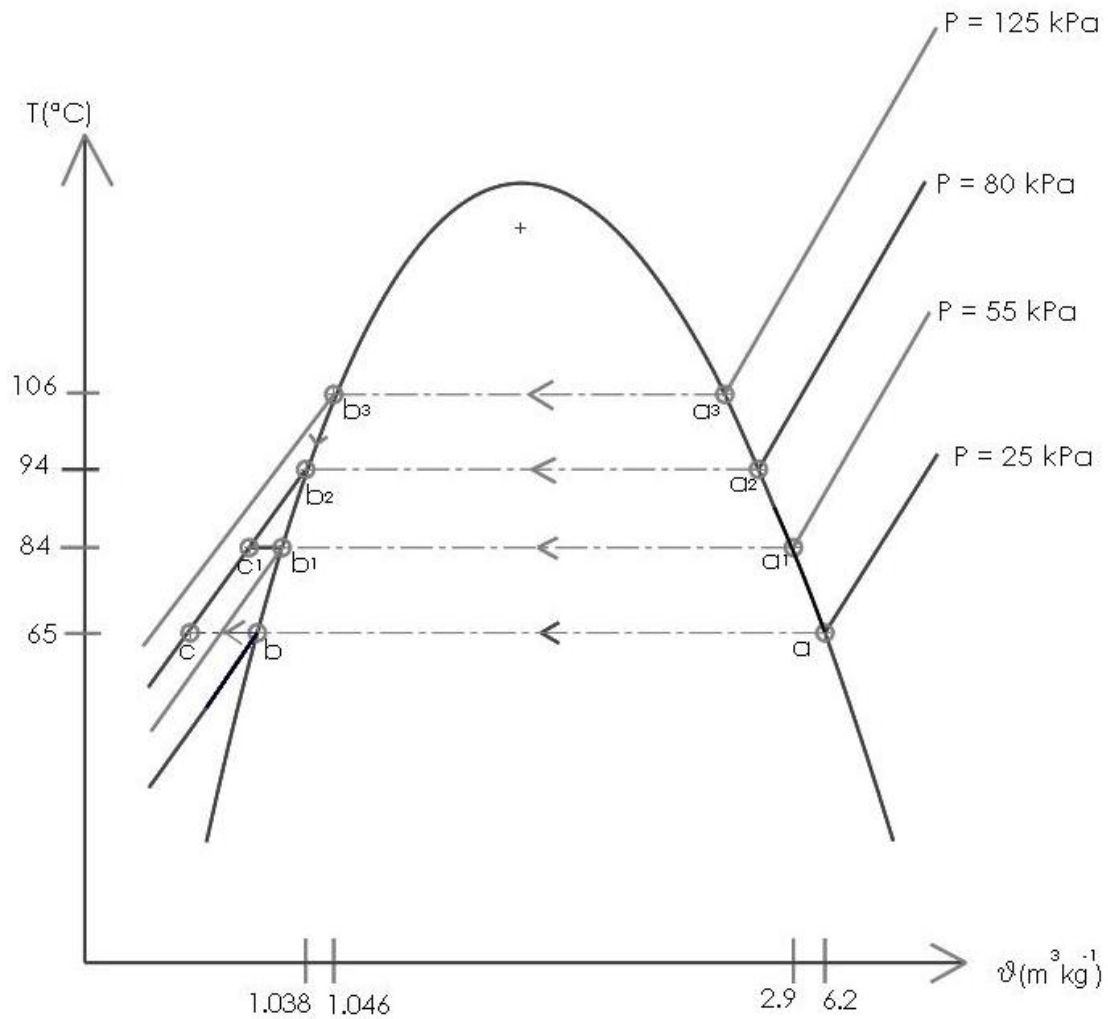


Figura 10. Trayectoria de compresión de vapor y salida del agua al colector

Agua obtenida

En la quinta prueba del primer experimento (presión de 75 kPa) el motor ya no arrancó y para explicar esto se realiza el siguiente análisis que se muestra en la figura 11.

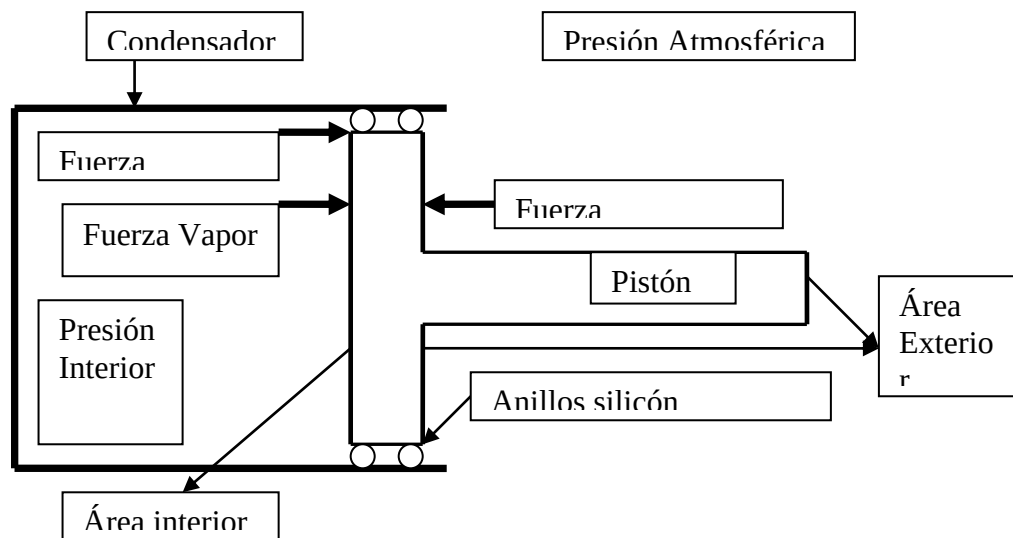


Figura 11. Balance de fuerzas en el pistón

Balance de Fuerzas cuando no existe motor

Fuerza del aire interior + Fuerza Fricción = Fuerza Atmosférica

Fuerza de Fricción = Fuerza Atmosférica - Fuerza Vapor

$$= P_{\text{atm}} A_{\text{exterior}} - P_{\text{vapor}} A_{\text{interior}}$$

Donde:

P_{atm} = Presión atmosférica = 80 kPa

A_{exterior} = Área exterior del pistón = $\pi r^2 = (3.1416) (0.0254 \text{ m})^2 = 0.002 \text{ m}^2$

P_{interior} = Presión Interior = 30 kPa

A_{interior} = Área interior del pistón = $\pi r^2 = (3.1416) (0.0254 \text{ m})^2 = 0.002 \text{ m}^2$

La presión interior fue obtenida por el manómetro que está colocado dentro del condensador. Se hace vacío en el sistema y se registra la presión del interior.

del condensador en el momento en que el pistón se comienza a mover. La presión atmosférica se obtuvo del centro de meteorología de la Universidad Autónoma Chapingo.

$$\begin{aligned}\text{Fuerza de Fricción Estática} &= P_{\text{atm}} A_{\text{exterior}} - P_{\text{vapor}} A_{\text{interior}} \\ &= 80 \text{ kPa} (0.002 \text{ m}^2) - 30 \text{ kPa} (0.002 \text{ m}^2) \\ &= 0.1 \text{ kN} = 100 \text{ N}\end{aligned}$$

En el momento que se trabaja con 75 kPa de presión el motor debe ejercer una fuerza que se determina a continuación.

$$\text{Fuerza Vapor} + \text{Fuerza Fricción} = \text{Fuerza Atmosférica} + \text{Fuerza del motor}$$

$$\text{Fuerza del motor} = \text{Fuerza Vapor} + \text{Fuerza Fricción} - \text{Fuerza Atmosférica}$$

$$\begin{aligned}&= 75 \text{ kPa} (0.002 \text{ m}^2) + 0.1 \text{ kN} - 80 \text{ kPa} (0.002 \text{ m}^2) \\ &= 0.09 \text{ kN} = 90 \text{ N}\end{aligned}$$

Por lo tanto el motor no arranca cuando se trabaja a una presión de 75 kPa puesto que el motor no puede desarrollar una fuerza de 90 N o mayor en el pistón.

En el experimento dos con el motor del doble de potencia se obtuvo casi dos veces más agua que en el primer experimento debido a que se tiene el doble de revoluciones por minuto. En la figura 12 se observa con líneas rayadas la cantidad de agua obtenida en las cinco pruebas del experimento uno.

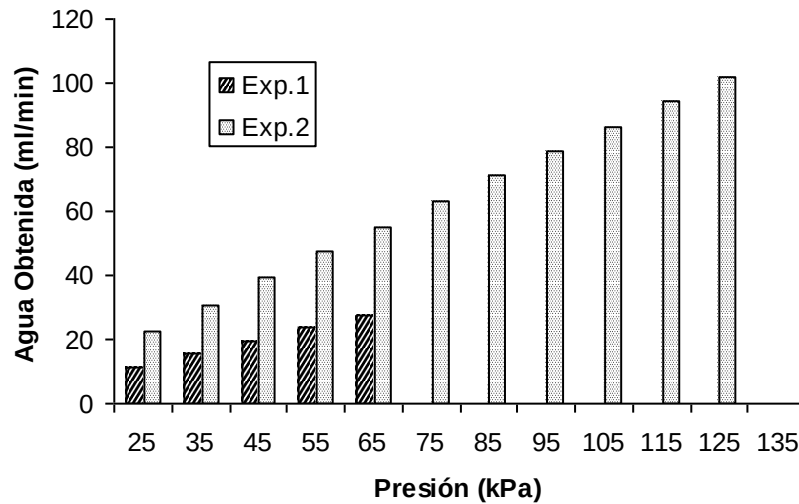


Figura 12. Cantidad de Agua obtenida en un minuto

Se observa también en la figura que a una presión de 135 kPa para el experimento dos (barras con puntos) el motor de 750 W ya no arrancó obteniéndose de la misma forma que en la prueba 6 del experimento 1, el valor de la fuerza a la cual ya no arranca el motor de 750 W.

Fuerza Vapor + Fuerza Fricción = Fuerza Atmosférica + Fuerza del motor

Fuerza del motor = Fuerza Vapor + Fuerza Fricción - Fuerza Atmosférica

$$= 135 \text{ kPa} (0.002 \text{ m}^2) + 0.1 \text{ kN} - 80 \text{ kPa} (0.002 \text{ m}^2)$$

$$= 0.21 \text{ kN} = 210 \text{ N}$$

Por lo tanto el motor no arranca cuando se trabaja a una presión de 135 kPa puesto que el motor no puede desarrollar una fuerza de 210 N o mayor en el pistón.

Al aumentar la presión del vapor dentro del evaporador la cantidad de agua obtenida siempre es mayor. Esto se debe a que el volumen específico es menor cuando se está a mayores presiones de vapor. En la figura 10 al posicionarse

en el punto “a” de la línea de vapor saturado, se tendrá un volumen específico de $6.2 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$. En el punto “a₁” se tiene un volumen específico de $2.9 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ y el volumen del condensador es de 80 cm^3 . Si se divide este volumen entre los volúmenes específicos se obtiene 0.013 y 0.027 g para las presiones de 25 y 55 kPa, respectivamente. En la presión más alta existe una masa mayor de agua en el condensador y por esta razón se obtiene más agua.

3.2.- Máximo tiempo de trabajo en experimentos uno y dos

Una vez que se encontró que a 65 kPa y a 125 kPa del primero y segundo experimento respectivamente, fueron las pruebas donde se obtuvo más agua, se prosiguió a dejar el dispositivo trabajando por más tiempo para ver cuánto tiempo pueden trabajar ambos motores antes de que se paren con el aumento de presión en el condensador. Se encontró que el tiempo fue de una hora quince minutos para el primer experimento y de 30 minutos para el segundo experimento como se observa en la figura 13. La razón de que se detenga el motor se debe a que la temperatura tanto del agua del tanque como del condensador van aumentando.

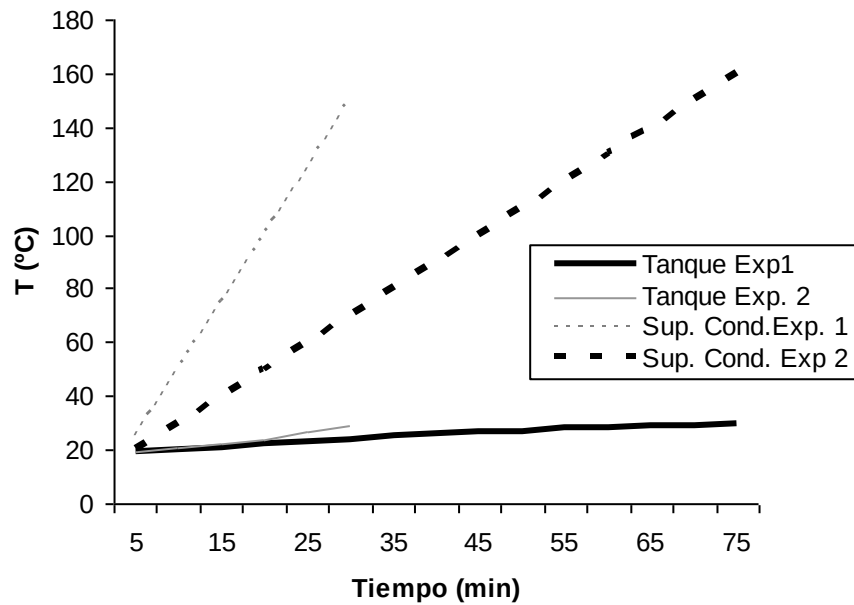


Figura 13. Temperatura Superficial Condensador y Agua de Tanque

Este calentamiento tiene sus efectos en la temperatura y presión dentro de la camisa, ya que estas van creciendo hasta que la presión en los últimos minutos del funcionamiento del sistema sube 10kPa en ambos experimentos (figura 14) llegando al punto donde se alcanza una presión cuya fuerza no puede superar el motor. Este aumento de presión en el condensador se debe a que el agua salada usada para enfriar el condensador se va calentando disminuyendo así la transferencia de calor debido a una menor diferencia de temperaturas entre el agua de enfriamiento y el condensador.

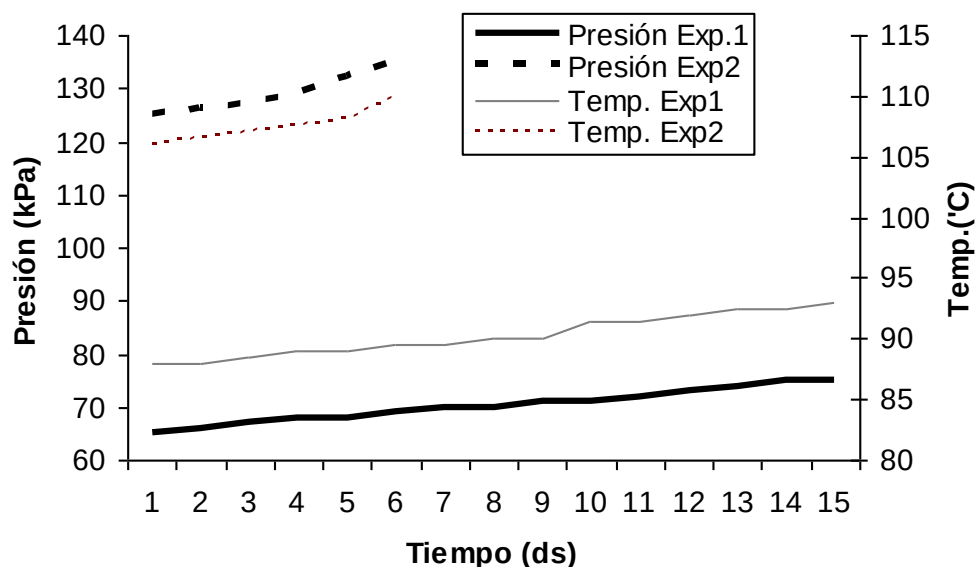


Figura 14. Aumento de temperatura y presión dentro del Condensador

El aumento de presión y temperatura durante la compresión en el condensador se refleja también en el diagrama de la figura 15. En la quinta prueba del primer experimento cuando se trabajó con el vapor a una presión de 65 kPa, la presión y temperatura fueron subiendo del punto A al punto B. En el punto B donde se tenía una presión de 75 kPa el motor se detuvo. En el experimento dos cuando se trabajó a una presión de 125 kPa ocurrió también que se paso del punto “A₁” al “B₁” donde se tenía una presión de 135 kPa la cual representaba una presión demasiado alta para el motor de 750 W.

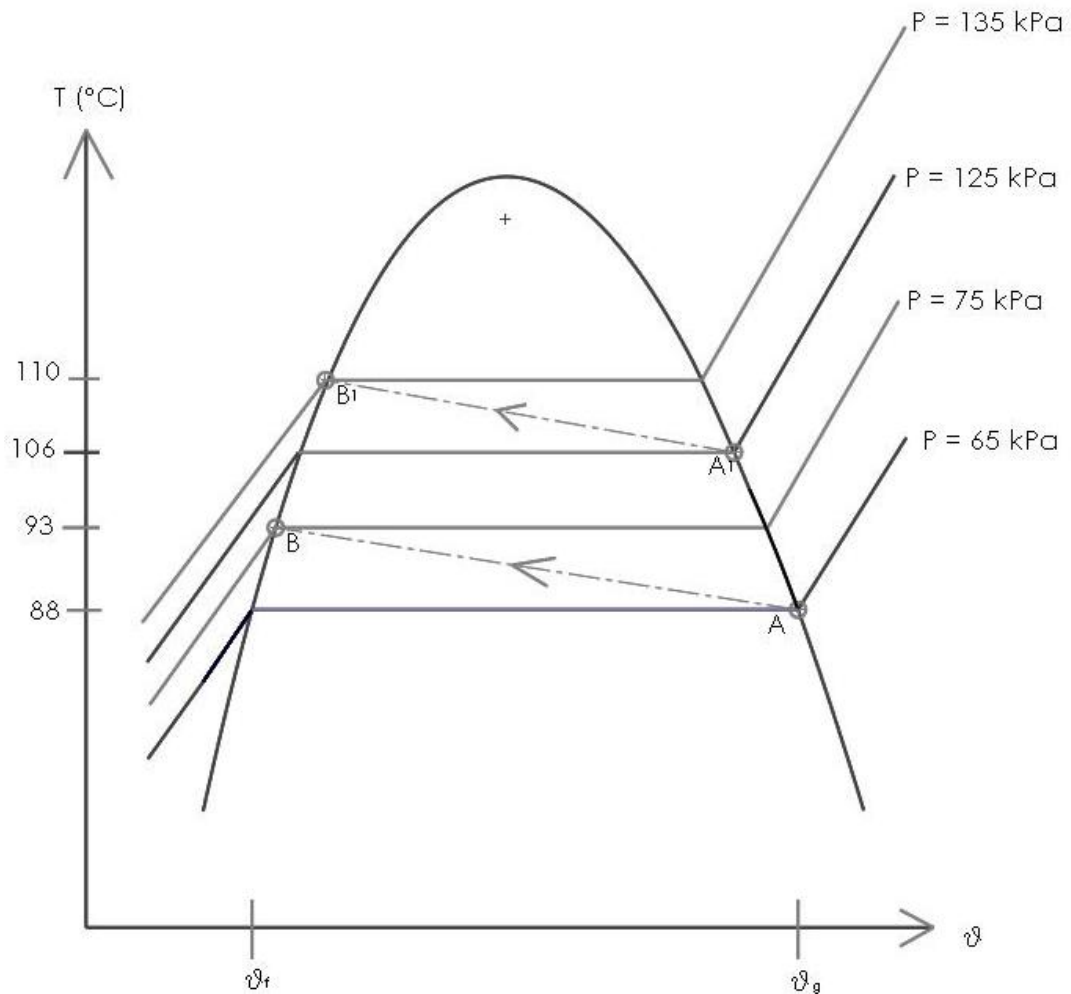


Figura 15. Comportamiento del vapor dentro del condensador

Las cantidades de agua que se obtuvieron para el primero y segundo experimento fueron de un poco más de 2100 ml en 75 min y 3270 ml en 30 min respectivamente (figura 16). Por lo tanto, a presiones más altas se obtiene una mayor cantidad de agua en un menor tiempo, sin embargo una de desventaja es que se calienta más rápido el condensador reduciendo de esta forma su tiempo de uso.

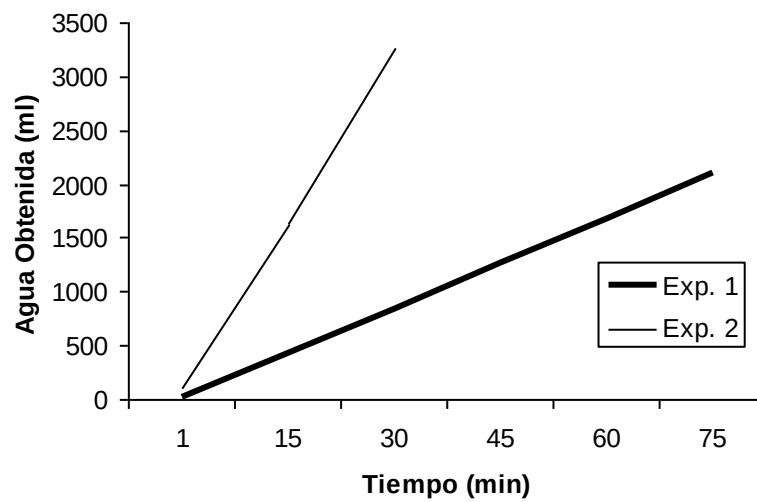


Figura 16. Máxima cantidad de agua obtenida hasta el paro del motor

Después de cada experimento fue necesario limpiar la resistencia de las sales que se van acumulando. El único problema cuando se trabaja con aguas salinas es que se van incrustando en la resistencia lo cual reduce poco a poco la transferencia de calor.

3.3.- Energía que consume el dispositivo

Es siempre importante saber el consumo energético de un dispositivo para poder conocer el costo de producir agua. En la figura 17 se muestra el consumo teórico de la resistencia y su consumo real en el experimento dos

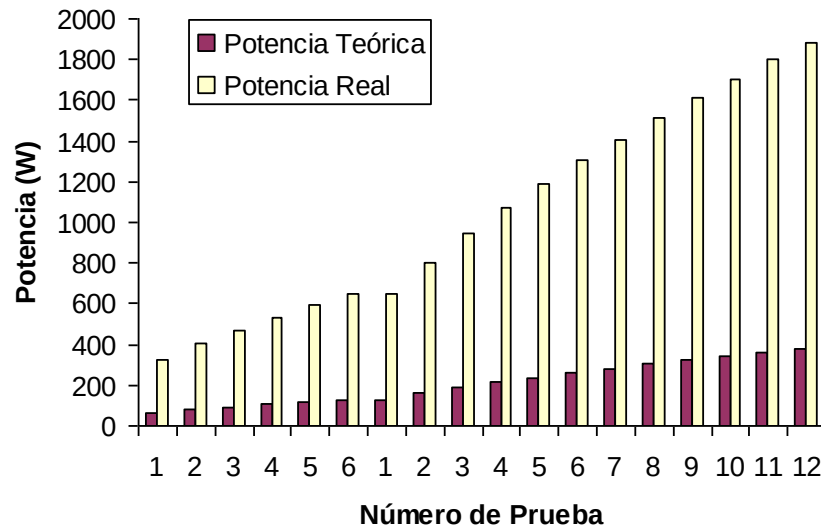


Figura 17. Comparación de potencia teórica y real

La potencia de cada aparato eléctrico es el siguiente:

- Bomba de Agua Alimentación: 6 W
- Resistencia: 2000 W
- Bomba Agua Enfriamiento: 100W
- Motor de Compresor: 750 W

$$\begin{aligned}\text{Potencia total utilizada} &= 6 \text{ W} + 2000 \text{ W} + 100 \text{ W} + 750 \text{ W} \\ &= 2853 \text{ W} = 2.8 \text{ kW}\end{aligned}$$

$$\text{Litros por hora} = 6 \text{ L hr}^{-1}$$

$$\text{Horas por litro} = 1 / 6 \text{ L hr}^{-1} = 0.16 \text{ hr L}^{-1}$$

$$\text{Energía por litro} = 2.8 \text{ kW} \times 0.16 \text{ hr L}^{-1} = \mathbf{0.46 \text{ kW hr L}^{-1}}$$

En México el costo por kW hr = \$ 1.5 (kW hr)⁻¹

$$\text{Costo por litro} = \$ 1.5 \text{ (kW hr)}^{-1} \times 0.46 \text{ kW hr} = \mathbf{\$ 0.7}$$

Se puede observar que la mayor cantidad de energía la consume la resistencia, en otras palabras la energía para evaporar el agua es casi tres veces la necesaria para condensarla.

En la cuadro 3 se hace una comparación de los diferentes métodos de desalinización. Estos se experimento se llevaron a cabo durante este trabajo con el fin de conocer las ventajas y desventajas de cada sistema. En el apéndice se puede ver la metodología de cada sistema y la cantidad de agua que se obtuvo.

Cuadro 3. Comparación de los diferentes métodos de desalinización

Método de Desalinización	Energía por Litro (kW hr L ⁻¹)	Precio por Litro (\$ L ⁻¹)	Agua por hora (ml hr ⁻¹)
Vapor de Agua del Ambiente	0.4	0.6	500
Solar	0	0	300
Por Vacío	2	3	50
Compresión de Vapor	1	1.5	1000
Usando Vacío y Condensando por Compresión	0.46	0.7	6000

3.4.- Calidad del Agua

Se Realizó un análisis químico en las instalaciones del departamento de irrigación de la Universidad Autónoma Chapingo. La conductividad eléctrica del agua salada de 500 mili-siemens paso a cero lo cual demuestra la eliminación de la salinidad. La mayoría de los valores tuvieron una disminución

considerable ya que la cantidad de sal disminuyó. Solamente el PH fue la propiedad que tuvo una disminución de dos unidades.

Cuadro 4. Resultado del análisis químico

Propiedad del Agua	Agua Salada	Agua Dulce
PH	8	6
Conductividad Eléctrica	500 mS cm ⁻¹	0
Sodio (mg Na ⁻¹)	200	0
Calcio (mg L ⁻¹ Ca)	400	0
Magnesio (mg L ⁻¹ Mg)	1000	0
Carbonatos (mg L ⁻¹ CO ₃)	0	0
Bicarbonatos(mg L ⁻¹ HCO ₃)	0	0
Cloruros(mg L ⁻¹ Cl)	20	0
Sulfatos(mg L ⁻¹ SO ₄)	2000	0
Potasio (mg L ⁻¹ K)	300	0

4.- CONCLUSIONES

En este trabajo se ha comprobado que es posible condensar vapor utilizando vacío y condensando por compresión obteniendo arriba de dos litros en una hora quince minutos con un motor de 375 W o poco más de tres litros en media hora con un motor de 750 W. Es claro que trabajando a presiones más altas se obtiene más agua pero se calienta más rápido y el dispositivo se puede usar por tiempos más cortos. Por lo tanto una solución a este problema sería usar dos motores de 375 W trabajando a presiones menores a la atmosférica y mientras uno trabaja el otro se enfría obteniendo así más agua y usando los motores por un tiempo más prolongado.

Es método de desalinización usando vacío y condensando por compresión se puede desarrollar mediante un dispositivo pequeño como el de este trabajo ya que otros métodos de desalinización sólo se justifican a escalas grandes. Los resultados comprueban la viabilidad de este método para la producción de agua para consumo humano y un análisis químico demostró la desalinización del agua.

La energía consumida durante la evaporación es de tres veces la consumida por el resto del proceso. Por esta razón sería importante usar espejos parabólicos u otros medios de energías no contaminantes para evaporar el agua. Además para resolver el problema del calentamiento del condensador, este podría sumergirse en el mar el cual es un sumidero y su temperatura no aumenta a pesar de la transferencia de calor del condensador.

5.- BIBLIOGRAFÍA

- Abu,Jabal. , I. Kamiyab and Y. Narasakib. 2001. Proving test for a solar-powered desalination system in Gaza-Palestine. Environmental Engineering. 137: 1–6.
- Adel, K. 2003. Mechanical vapor compression desalination systems, a case study. Desalination. 158: 143–150.
- Bautista, A. 2008. La humedad atmosférica como fuente opcional de agua para uso doméstico. Agrociencia.45: 293-301.
- Chafik, E. 2003. A new sea water desalination process using solar energy. Thermo and Fluid Dynamics. 45:78-80.
- Beysens, D., and I. Milimouk. 2001. The case for alternative fresh water sources. Desalination. 23:67-72.
- Christos, D. 2006. Condensation in Ducts. Desalination.
- Correa F., 2007, Evaluación de la sustentabilidad en la instalación de plantas desaladoras de agua de mar en la región noroeste de México. Tesis, Las Palmas de Gran Canaria, España.
- Dickey L., February 1994. Compressed condensation of water vapor on chilled brine. International Journal of Multiphase Flow. 20: 179–184.

- Fariñas M. 1999. Osmosis Inversa fundamentos, tecnología y aplicaciones. McGrawHill España.
- Fritzmann, C., J. Löwenberg , T. Wintgens., and T. Melin. 2007. Verfahrenstechnik. RWTH.216: 1–76.
- Fuentes M. 2002, Desalación de agua, una alternativa para resolver la demanda de agua potable en el sur de la república mexicana, XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental Cancún, México.
- Hilpert, R.1933. Wärmeabgabe von geheizten Drahten und Röhren. Forsch. Geb. Ingenieurwes. 4:220.
- Houcine, I., M. B. Amara, M. B. Guizani, A. Maalej. 2006. Pilot plant testing of a new solar desalination process by a multiple-effect-humidification technique. Desalination 196: 105–124.
- Knudsen, J., D. Katz. 1958. Fluid Dynamics and Heat Transfer. McGraw Hill.
- Lara, J. 2005. Advanced Mechanical Vapor-Compression Desalination System. Texas A & M University.
- Lindblom J, Nordell B. 2006. Water production by underground condensation of humid air. Desalination. 34:67-71
- Lindblom, J. and B. Nordell 2004. Underground condensation of humid air for drinking water production and subsurface irrigation. Desalination. 56: 23-45.
- Moyers, C.1998. Psychrometry, Evaporative Cooling and Solids Drying. McGraw Hill.
- McGinnis, F., and J. Holman. 1969. Individual Droplet Heat Transfer Rates for Splattering on Hot Surfaces. Int. J. Heat Mass Transfer. 12: 95-97

- Narayan, P. 2003. The potential of solar-driven humidification dehumidification desalination for small-scale decentralized water production.
- Nassar, A. 2007. The second generation of the solar desalination Systems, 209: 177–181.
- Nelson A. 2003. Air Wells, Fog Fences & Dew Ponds
- Peter, V., M., Zurbru, C. Swartz, C. Pronk. 2009. Decentralized systems for potable water and the potential of membrane technology. Water Research. 43: 245–265.
- Rousseau Z.1999. Control of Surface and Concealed Condensation
 - Schrotter, J., S. Rapenne, J. Leparç. 2010. Comprehensive Membrane Science and Engineering. 2: 35-65.
- Sharan G. 2001. Harvesting dew to supplement drinking water supply in arid coastal villages of Gujarat.
- Singh B. 2005. Water condenser
- Wahlgren, R., 2001. Atmospheric water vapor processor designs for potable water production: a review. Water Research 35: 1-22.
- Wangnick, K. (2000). 2000 IDA Worldwide Desalting Plants Inventory Report N° 16,25-246.
- Werner, A. 2000. External Water Condensation and Angular Solar Absorptance Theoretical Analysis and Practical Experience of Modern Windows
- Wilf, P., 2007. The guidebook to membrane desalination technology. Balaban Desalination Publications..

6.- APÉNDICE

Métodos de obtener agua dulce

1.- Condensación de Vapor de Agua del Ambiente



Materiales: Refrigerador de 190 W con serpentín con aletas, Charola

Método: Este experimento se llevo a cabo en Zihuatanejo Guerrero el cual se encuentra al nivel del mar y se tiene una humedad relativa de 85% y una temperatura de 29 °C. El sistema comienza cuando se arranca el refrigerador para enfriar el serpentín, en seguida con el ventilador se hace pasar aire del ambiente a través del serpentín para condensar la humedad del ambiente. Se encontró que colocando el serpentín y el ventilador en posición horizontal como se muestra en la figura se condensa mayor cantidad de vapor de agua.

Resultado: 500 ml hr⁻¹

2.-Humidificación de aire para condensación con método uno



Materiales: Tubo de 10 cm de diámetro de PVC, extractor de aire, resistencia, nebulizador de agua.

Método: Este experimento se llevo a cabo en la Universidad de Chapingo cuando la humedad relativa era de 30 % y la temperatura del ambiente de 21 °C. El experimento comienza cuando se hace pasar aire a través del tubo por medio del extractor, se enciende la resistencia y se nebuliza agua hacia dentro del tubo. El aire que sale por el extractor tiene un humedad del 85% y una temperatura de 32 °C. Este aire se hace pasar por el refrigerador del primer experimento para obtener una cantidad de agua similar. La ventaja de este experimento es que se puede realizar en zonas no costeras donde la humedad relativa y la temperatura son bajas.

Resultado: 600 ml hr⁻¹

3.- Desalinización Solar



Materiales: Dos espejos de 60 x 40 cm, depósito de agua de color negro, vaso grande de cristal, plástico transparente, agua salada.

Método: Se vierte el agua salada dentro del depósito negro y enseguida se coloca el vaso de cristal en el centro del depósito. Se cubre la parte de arriba del depósito con el plástico transparente y se pone una piedra sobre este para lograr que el plástico tenga una inclinación hacia el centro. Los espejos son colocados de manera que reflejen la luz del sol hacia el depósito y se espera una hora a que el sistema se estabilice y agua se comience a evaporarse. En la figura se muestra como el vapor toca el hule y se condensa. Esta agua condensada resbala por el plástico hasta llegar al centro y caer en el vaso de cristal

Resultado: 300 ml hr⁻¹

4.- Destilación por Compresión de Vapor



Materiales: Tambo de 200 L, serpentín de cobre, bomba de agua con manguera para recirculación de agua Olla Express con manómetro y termómetro, resistencia, llave de aguja agua salada.

Método: Como se muestra en la figura el serpentín se encuentra dentro del tambo que esta lleno de agua que se utiliza para enfriar el serpentín. Este serpentín se encuentra en un extremo conectado a la olla Express y en cuya unión se tiene una llave de paso tipo aguja la cual se mantiene cerrada. Se coloca agua salada en la olla express y empieza a calentar con la resistencia hasta obtener una presión y temperatura de 200 kPa (absoluta) y 120 °C respectivamente en cuyo momento se abre la llave de aguja para dejar escapar el vapor y este se condense en el serpentín y sea recolectado en la bandeja de plástico como se muestra en la figura. El proceso se repite cerrando otra vez la llave de paso y esperando 10 minutos a que se obtengan la presión deseada. La finalidad de aumentar la presión, es que la temperatura aumenta y al ser mayor la diferencia de temperatura entre el vapor y el agua del tambo, la condensación será más rápida.

Resultado: 1000 ml hr⁻¹

5.- Vacío



Materiales: 2 tubos de vidrio de 1 m de largo, bomba de vacío, manómetro y termómetro, 2 tramos de manguera de 7.5 m, un tubo galvanizado de diámetro 19 mm y largo 3 m, agua salada y agua dulce.

Método: Este experimento se llevo a acabo en la Universidad de Chapingo donde la altura sobre el nivel del mar es de 2240 m y por lo tanto la presión atmosférica es de 80 kPa. El experimento que se muestra en la figura de la izquierda se coloca a una altura de nueve metros. El sistema queda como una “U” invertida con los tubo galvanizado en la parte superior, los tubos de vidrio en cada extremo de manera vertical y los tramos de manguera en cada extremo de la “U” con los recipientes que se muestran el la figura derecha, uno con agua salada y el otro con agua dulce. La bomba de vacío que está en la parte superior se prende por 1 minuto para hacer vacío en todo el tubo en “U” y por efecto de la presión atmosférica el agua salada y dulce comenzarán a subir por

cada extremo de la “U” hasta alcanzar una altura de 8.4 m. Como el agua no llega a los nueve m, en la parte de arriba se tiene vacío el cual es útil para poder evaporar el agua una temperatura de 64 °C. Ser caliente el tubo con agua salada y al subir el vapor al tubo galvanizado, esta se condensa bajando por el tubo del otro lado que tiene agua dulce.

Resultado: 50 ml hr⁻¹