

# Optimización y Pruebas de una Planta Piloto de Destilación de Agua al Vacío.

por

FAUSTINO MORENO GAMBOA.

Tesis presentada a  
La Universidad de los Andes  
Como requisito parcial de grado  
Programa de Maestría  
En Ingeniería Mecánica

Bogotá, Colombia, 2003

©(Faustino Moreno), 2003

Declaro que soy el único autor de la presente tesis Faustino Moreno Gamboa  
Autorizo a la Universidad de los Andes para que este tesis sea prestada a otras  
instituciones o personas para propósitos de investigación solamente.

Firma

También autorizo a la Universidad de los Andes para que este documento sea  
fotocopiado en su totalidad o en parte por otras instituciones o personas con fines  
de investigación solamente.

Firma

## **PÁGINA DEL LECTOR**

La Universidad de los Andes requiere la firma de todas las personas que utilicen o fotocopien esta tesis. Favor firmar debajo dando nombre y dirección.

Bogotá, Julio 1 de 2002

Doctor  
ALVARO PINILLA  
Director  
Departamento de Ingeniería Mecánica  
Universidad de los Andes

Estimado doctor Pinilla

Por medio de la presente me permito poner en consideración el proyecto de grado titulado : “Optimización y pruebas de una planta piloto para la destilación de agua al vacío” como requisito parcial de grado del programa de Maestría en ingeniería Mecánica

Agradezco su amable atención y me suscribo de Ud.

Atentamente,

Faustino Moreno G..

## **AGRADECIMIENTOS**

Deseo agradecer a las siguientes personas que me brindaron su apoyo para la realización de este trabajo de tesis.

Ing. Rafael Beltrán Pulido por su valiosa colaboración y apoyo en el desarrollo de todas las actividades del proyecto.

Ana Ines Gamboa por su apoyo integral.

Claudia Barragán por su apoyo financiero y en el desarrollo del documento.

## RESUMEN

Teniendo en cuenta la necesidad de desarrollar un equipo que permita suministrar agua potable a zonas alejadas o en desastre se desarrolla en la Universidad de Los Andes una planta experimental con el fin de destilar agua al vacío.

El desarrollo de la planta piloto de destilación al vacío ha tenido varias etapas dentro de las cuales se han modificado aspectos como el suministro de calor al tanque de vacío, sistema de condensado entre otros

El objetivo primordial del presente proyecto es evaluar algunas condiciones de la planta piloto, como la producción de agua y el consumo de energía, adicionalmente buscar la reducción del consumo de energía por litro producido.

Para lograr el objetivo planteado se desarrollaron las siguientes actividades:

Caracterización de la producción de agua destilada en las condiciones iniciales de la planta piloto, medición del consumo de energía de la planta en operación y su relación con los litros de agua producida.

Se determinaron las anteriores características y la generación de vacío con una motobomba y un eyector disponibles en el taller de Ingeniería Mecánica.

Se seleccionó una nueva motobomba de bajo caballaje, se diseñó y fabricó un dispositivo tipo eyector con las condiciones de entrada de la nueva motobomba, con estos nuevos componentes se lograron nuevas condiciones de operación. Dado que los nuevos componentes no generan las condiciones ideales de operación se realizaron nuevas pruebas buscando intercambiar componentes.

Teniendo en cuenta los resultados anteriores se realizaron pruebas posteriores que nos permitieran conocer las condiciones de presión a la entrada del eyector de vacío, con el fin de recomendar una motobomba que genere una reducción en el consumo de energía y el vacío suficiente para que la planta pueda producir 100 litros de agua al día.

Cumplido el proceso anterior se obtienen las bases para realizar las recomendaciones y conclusiones para el proyecto.

## CONTENIDO.

	Página.
0 INTRODUCCION.	1
1. CONDICIONES ACTUALES DE LA PLANTA PILOTO.	3
1.1 Esquema general de la planta.	3
1.1.1 Ciclo de la bomba de calor.	4
1.1.2 Ciclo de agua para condensación y vacío.	4
1.2 Medición de la producción de agua destilada.	4
1.3 Medición del consumo de energía en la planta piloto.	5
1.4 Consumo de energía por litro de agua destilada.	6
1.5 Medición de caudales en la planta piloto.	6
1.6 Medición de temperaturas en el agua de destilación.	6
2. MOTOBOMBA PARA LAS PRUEBAS.	9
3. DISEÑO Y FABRICACION DE UN EYECTOR.	11
3.1 Principios del eyector.	11
3.2 Diseño del eyector.	13
3.2.1 Diseño de la boquilla.	13
3.2.2 Diseño del difusor.	15
3.3 Fabricación del eyector.	17
4. MONTAJE DE LA PLANTA.	18
4.1 La estructura.	18
4.2 Adecuación de la bomba de calor.	18
4.3 Montaje de la motobomba.	19
4.4 Montaje del eyector de vacío.	19
5. PRUEBAS Y RESULTADOS	21
5.1 Medición del consumo de energía.	21
5.2 Medición de la presión en el tanque de vacío.	21
5.3 Presión requerida a la entrada del Eyector	23
5.4 Comparación de operación de motobombas	23
5.5 Motobombas recomendadas para el proyecto	24

6. CONCLUSIONES.	26
7. RECOMENDACIONES.	27
ANEXOS.	28
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	30



## LISTA DE FIGURAS.

	Página	
Figura 1-1	Esquema de la planta de destilación.	3
Figura 1-2	Producción de agua destilada.	4
Figura 1-3	Consumo de energía por litro de agua destilado.	6
Figura 1-4	Variación de la temperatura en vacío.	7
Figura 1-5	Comparación del consumo de energía.	8
Figura 3-1	Esquema del eyector.	12
Figura 3-2	Esquema de la boquilla.	13
Figura 3-3	Esquema del difusor.	15
Figura 5-1	Comparación del consumo de energía de los equipos.	21
Figura 5-2	Comparación de las presiones de vacío.	22
Figura 5-3	Presión requerida a la entrada del eyector.	23

## LISTA DE FOTOGRAFIAS.

		Página
Foto 1-1	Equipo de medición de consumo de energía.	5
Foto 2-1	Motobomba para pruebas	10
Foto 2-2	Medición de la presión estática de la bomba.	11
Foto 3-1	Nuevo eyector.	17
Foto 4-1	Equipos sobre la estructura metálica.	18
Foto 4-2	Motobomba y sus conexiones.	19
Foto 4-3	Montaje del eyector.	20

## LISTA DE TABLAS.

		Página
Tabla 1-1	Consumo de energía.	5
Tabla 1-2	Caudales de operación de la planta.	6
Tabla 3-1	Dimensiones de la boquilla.	14
Tabla 3-2	Dimensiones del difusor.	16
Tabla 5-1	Comparación de operación motobombas.	23
Tabla 5-2	Motobombas recomendadas para el proyecto.	24

## INTRODUCCION.

En el presente proyecto de grado se desarrollo la optimización de una planta piloto de destilación de agua al vacío, desde el punto de vista del consumo de energía, la planta había sido construida en los talleres de la universidad en proyectos de grado anteriores, inicialmente se determinaron las características de la planta en cuanto a consumo de energía y producción de agua limpia, posteriormente se seleccionaron nuevos componentes de la instalación y una vez montados se determinaran las nuevas condiciones de consumo de energía y producción de agua.

El proyecto tiene como motivación especial hacer un importante aporte en el desarrollo de un equipo que permita suministrar agua potable a cerca de 100 personas por día en zonas donde se han sucedido desastres o en comunidades que pos diversas razones no cuentan con el servicio de agua potable.

Colombia tiene actualmente cerca de 40 millones de habitantes de los cuales cerca de 10 millones de personas no tiene acceso a servicio de agua potable, de los cuales un gran porcentaje no recibe una agua de buena calidad para el consumo humano, 15 millones de habitantes en Colombia no tienen redes de alcantarillado, la gran mayoría de estas en lugares apartados y en los cinturones de miseria de las ciudades, según información del Ministerio de Salud.

Los procesos de destilación al vacío tienen gran aplicación en la industria química y petrolera debido a lo favorable de sus características ya que se pueden destilar diferentes componentes a bajas presiones lo que reduce ostensiblemente la temperatura de evaporación y la energía que se requiere aplicar para llevar el componente a su punto de evaporación.

Referente a los procesos de destilación al vacío de agua, se han desarrollado en varias partes de mundo diferentes procedimientos en los que se destacan la generación reducción de presión por medio de bombas de vacío, incluso existen de este tipo equipos comerciales que producen hasta 100 litros por hora de agua destilada.

En el departamento de ingeniería mecánica de la Universidad de Los Andes se ha desarrollado un proyecto de destilación de agua el cual se ha cumplido en varias etapas como la destilación de agua a presión atmosférica mediante el cual el calor para la evaporación se aporta por medio de una resistencia eléctrica, posteriormente se creo el proceso de destilación de agua al vacío en el cual en el cual se produce vacío por medio de un eyector de vacío utilizando como fluido motivador agua, la energía térmica

requerida para la evaporación del agua se aporta por medio de una unidad de refrigeración utilizada como bomba de calor.

El objetivo principal de este proyecto es caracterizar y optimizar desde el punto de vista del consumo de energía la planta piloto de destilación de agua al vacío desarrollada en el departamento de Ingeniería Mecánica realizando pruebas de desempeño con diferente equipos.

Para cumplir el objetivo general del presente proyecto se desarrollaron las siguientes actividades.

- Se desarrollaron pruebas que permitirán conocer las características de consumo de energía y producción de agua limpia, además de otras características de operación.
- Verificar la opción de reducir el consumo de energía en las condiciones actuales.
- Realizar pruebas a una motobomba con la cual se pudiera circular el agua hacia el condensador y el eyector de vacío pero que generara un bajo consumo de energía.
- Se diseñó y fabricó un eyector para producir vacío en el tanque de destilación.
- Se construyó una estructura metálica con el fin de montar todos los componentes de la planta.
- Se realizó el montaje de la planta piloto sobre la estructura, con sus nuevos componentes.
- Se desarrollaron pruebas de desempeño de la planta en diferentes condiciones para determinar cantidad de agua producida y consumo de energía, además de otros parámetros de operación.

## 1. CONDICIONES ACTUALES DE LA PLANTA PILOTO DE DESTILACIÓN DE AGUA.

### 1.1 Esquema general de la planta.

En el taller de Ingeniería Mecánica de La Universidad de los Andes, se encuentra la planta piloto de destilación la cual se observa en la figura 1.1.

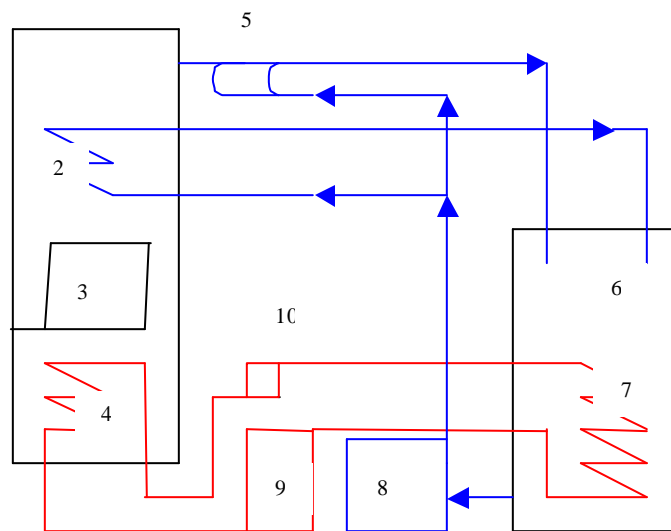


Figura 1.1 Esquema de la planta de destilación.

La planta de destilación consta básicamente de.

1. Tanque de destilación y vacío.
2. Intercambiador de calor para condensado.
3. Bandeja de recolección de agua condensada.
4. Serpentín para producir la evaporación.
5. Eyector de vacío.
6. Tanque para agua de circulación para condensación y vacío.
7. Serpentín para enfriar el agua de circulación.
8. Motobomba.
9. Bomba de calor.
10. Filtro secador

La operación de la planta piloto de destilación de agua al vacío se desarrolla por dos ciclos así:

### 1.1.1 Ciclo de la bomba de calor.

El circuito de la bomba de calor que consta de la bomba de calor los serpentines y el filtro secador, tiene como función por medio de refrigerante R22, calentar y evaporar el agua en al tanque de destilación y vacío, además de enfriar el agua del tanque de refrigeración.

El circuito anterior fue diseñado y montado en una tesis anterior.

### 1.1.2 Ciclo de agua para condensación y vacío.

El circuito de circulación de agua tiene como finalidad mover agua por medio de una motobomba desde el tanque hacia dos elementos, el primero un intercambiador de calor dentro de el tanque de destilación para condensar el vapor de agua allí generado y el segundo un eyector que genera el vacío dentro del tanque de destilación, permitiendo reducir la temperatura de evaporación del agua.

Este segundo circuito fue montado con una motobomba y un eyector disponibles en el laboratorio, por lo cual presenta condiciones no propicias para la planta, por ejemplo la motobomba es de 1 Hp, donde perfectamente se puede utilizar una bomba de mucha menor potencia.

## 1.2 Medición de la producción de agua destilada

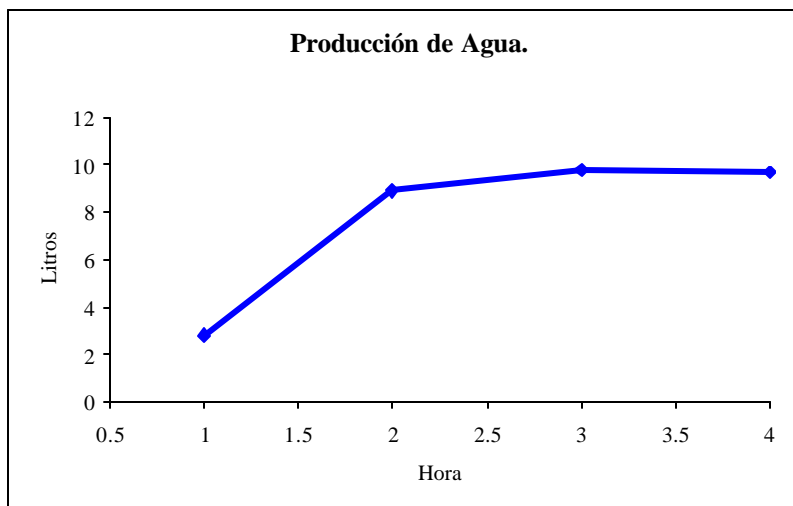


Figura 1.2. Producción de agua destilada.

Se realizaron 4 pruebas solo para determinar la producción de agua pura utilizando cronometro y un recipiente con medidas volumétricas. Cada prueba se inicio con 40 litros de agua dentro del tanque de destilación el resultado de la prueba se observa en la figura 1.2. donde se puede observar que inicialmente la producción de agua es relativamente baja debido a que el agua se demora en alcanzar su temperatura de evaporación, una vez alcanzada dicha temperatura la producción de agua se estabiliza.

### 1.3 Medición del consumo de energía de la planta piloto.

Se desarrollo una nueva serie de pruebas para medición de la producción de agua y midió el consumo de energía de la motobomba y la bomba de calor, estas mediciones se realizaron con un Analizador Armónico de Potencia (Fluke 41B) el cual se observa en la foto 1.1, de este equipo se obtuvieron los valores instantáneos de Kilovatios, Amperio y Voltios, los datos se pueden observar en la tabla 1.1

<i><b>Unidad</b></i>	<i><b>Motobomba</b></i>	<i><b>Bomba Calor</b></i>
Kilovatios	0.86	0.6
Voltios	118	117
Amperios	8.84	7.4

Tabla 1.1 Consumo de energía

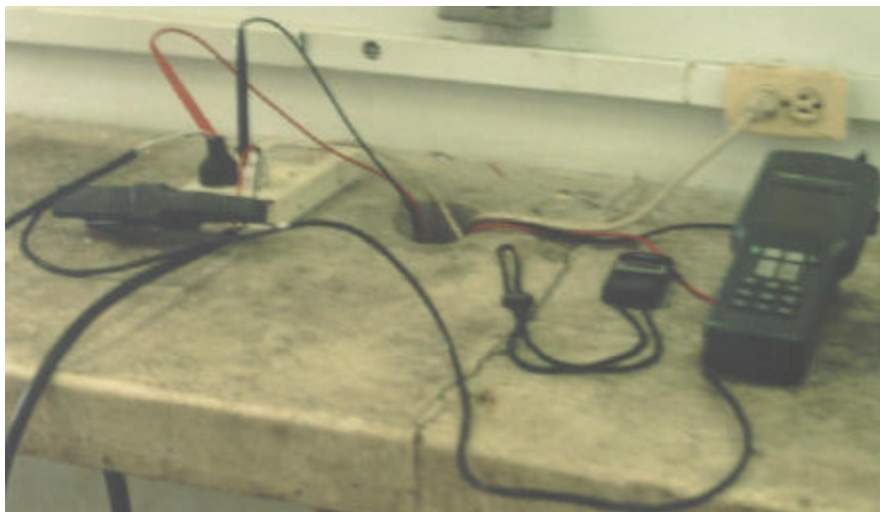


Foto 1.1 Equipo de medición del consumo de energía.



Según los anteriores valores en consumo total de energía por hora de la planta es de **1.46 Kw-h.**

#### 1.4 Consumo de energía por litro de agua destilada.

Con los datos de cantidad de agua producida y consumo de energía en la planta piloto se determino el consumo de energía por litro de agua producida, los resultados se observan en la figura 1-3.

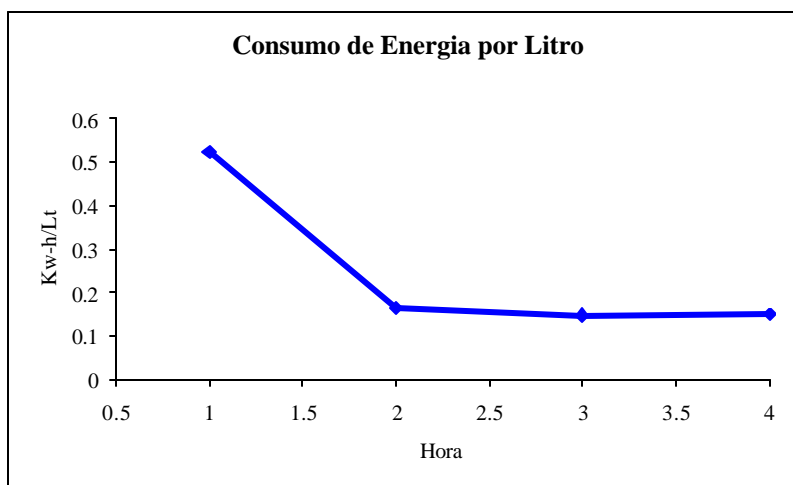


Figura 1.3. Consumo de energía por litro de agua.

#### 1.5 Medición de caudales en la planta piloto.

Se realizaron mediciones de caudales en la planta piloto, utilizando un medidor de caudal, recipiente y cronometro, los resultados se observan en la tabla 1-2.

<i>Equipo</i>	<i>Lt/Sg</i>
Motobomba	0.813
Intercambiador de calor	0.201
Eyector de vacío	0.612

Tabla 1-2 Caudales de operación de la planta.

#### 1.6 Mediciones de temperatura

Para determinar si la bomba de calor se puede apagar periódicamente con el fin de reducir el consumo de energía de la misma por lo tanto se debe tener en cuenta que

para la presión de vacío que se tiene en promedio en el tanque de  $-17$  in Hg, la temperatura de saturación  $39.6$  ( $^{\circ}\text{C}$ ).

Se realizó una prueba midiendo la variación de temperatura del agua en el tanque de vacío, Los resultados se observan en la figura 1.4

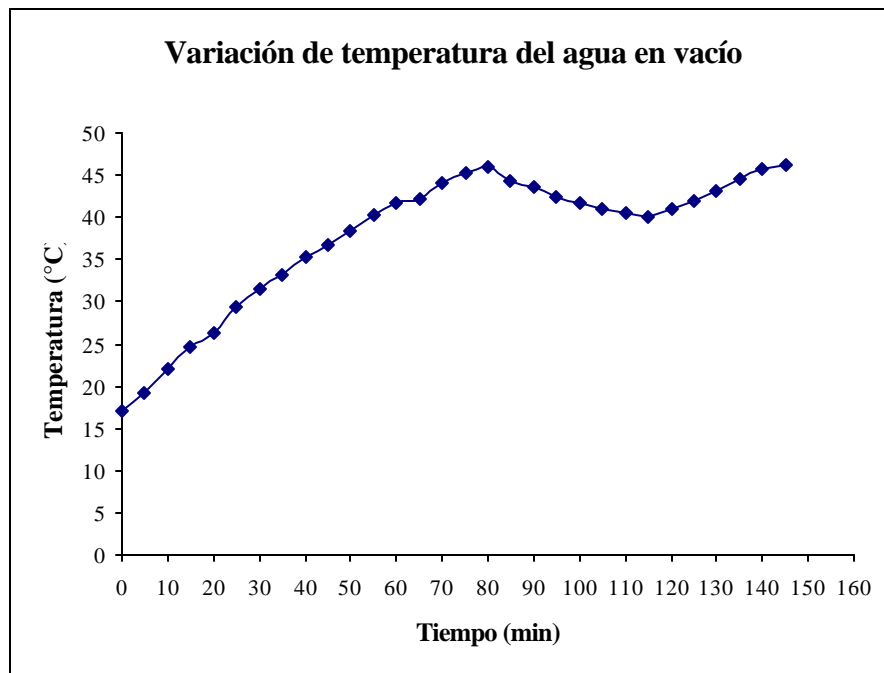


Figura 1.4 Variación de temperatura del agua en vacío

Observando con detenimiento se puede ver que el agua llega a su temperatura de saturación aproximadamente a los 52 minutos de encendido. Luego se dejó llegar la temperatura del agua a  $46$   $^{\circ}\text{C}$ , a la cual llegamos a los 80 minutos de operación de la planta y allí se apagó la bomba de calor, se observó que la temperatura del agua empieza a descender y una vez llega a su temperatura de saturación nuevamente en 28 minutos, en ese instante se prende nuevamente la bomba de calor.

De lo anterior podemos deducir que en la segunda hora de operación de la planta, la bomba de calor puede estar apagada la segunda media hora de operación. Esto crearía la opción de reducir el consumo de energía teniendo apagada la bomba de calor, se pasaría de un consumo constante de  $1.46$  kw-h a un consumo variable de energía que reduciría el consumo promedio de energía por litro de agua destilada, tal como se observa en la figura 1.5, donde la reducción en el promedio del consumo de energía es del 10%

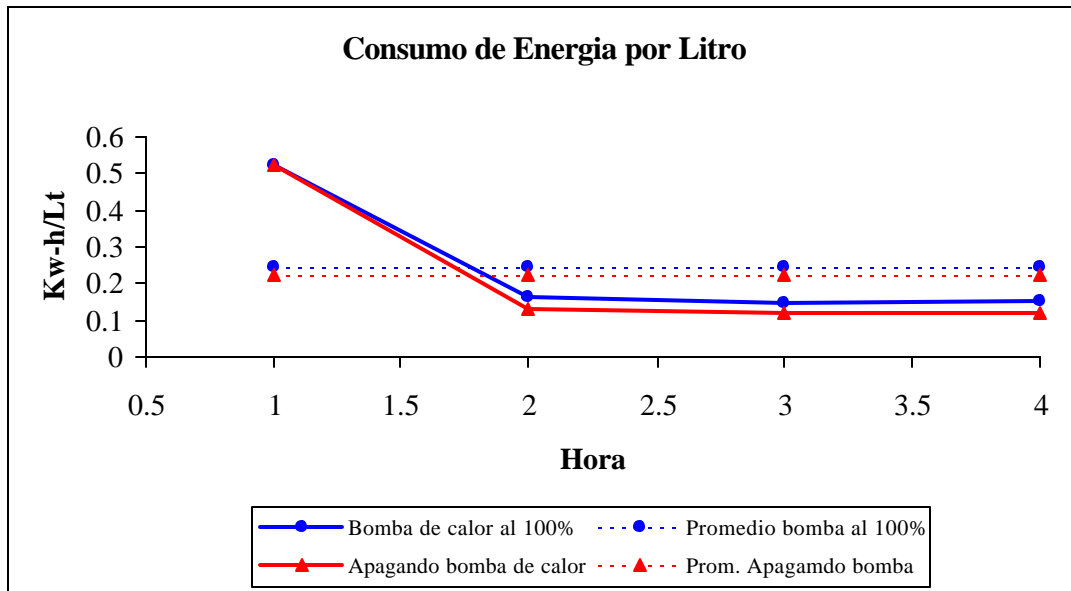


Figura 1.5 Variación en el consumo de energía alternando el funcionamiento De la bomba de calor.

## 2. MOTOBOMBA PARA LAS PRUEBAS

El primer paso para el desarrollo de las nuevas pruebas, aplicando otros componentes en la planta piloto fue la selección de una motobomba que presentara las siguientes características.

- Bajos consumo de energía de manera que la planta pueda producir agua destilada con un menor consumo de energía en sus componentes.
- Que tenga un tamaño adecuado para montar sobre la estructura metálica.

Inicialmente se pensó en una motobomba que tuviera un motor de entre 1/10 y 1/20 Hp, de esta forma reduciríamos considerablemente el consumo de energía en el sistema, pero comercialmente y con estas condiciones solo se pueden encontrar bombas sumergibles que tiene las siguientes características:

- Las bombas sumergibles producen buenos niveles de caudal
- Los tamaños son bastante pequeños
- La altura de presión de las bombas sumergibles son demasiado bajas.

Se descarto la posibilidad de las bombas sumergible debido a su baja altura de presión ya que esto representaría problemas tanto en el intercambiador de calor como en el eyector, adicionalmente obligaría a ampliar el tanque del agua de enfriamiento y hacer nuevamente el diseño de la carga de refrigerante y los serpentines del la bomba de calor.

Debido a lo anterior se reviso la opción de utilizar motobombas de desplazamiento positivo pero esta posibilidad se descarto debido a su alto costo y su poca disponibilidad comercial.

Se paso a considerar la posibilidad de una motobomba centrifuga donde después de revisar varias opciones se determino utilizar una motobomba marca Barnes con las siguientes características:

Potencia:	0.18 kw.
Caudal máximo:	130 L/sg
Altura máxima:	18 m
Voltaje:	110
Frecuencia:	60 Hz.

Características adicionales de la cual los datos se encuentran en el anexo1, La Motobomba se observa en la foto 2.1.

En la elección de la motobomba fue parámetro importante su bajo consumo de energía, una vez montada se determinaron los caudales de operación los cuales se midieron utilizando un recipiente con medidas volumétricas y un cronometro.

Caudal para el intercambiador de calor:

0.166 Lt./Sg.

Caudal para el eyector de vacío:

0.623 Lt./Sg.

Caudal total de la motobomba:

0.789 Lt./Sg.

En un capítulo posterior se realiza el diseño de un eyector de vacío para lo cual es muy importante obtener dos datos de la operación de la Motobomba como son el caudal de agua que pasa por el eyector y la presión estática a la entrada del mismo, entonces fue necesario medir dicha presión, con el uso de un manómetro el cual se puede observar en la foto 2.2 se logro medir la presión estática a la entrada del eyector de vacío la cual dio un valor de **21 Psi**.



Foto. 2-1 Motobomba para pruebas

MIM-2003-1-11



Foto 2-2 Medición de presión estática a la entrada del eyector.

### 3. DISEÑO Y FABRICACIÓN DEL EYECTOR DE VACÍO.

Paso seguido de la selección de la Motobomba se buscó la opción de seleccionar un eyector comercial, pero el mercado de este tipo de equipos es muy reducido y no se logró conseguir un equipo que cumpliera con las condiciones requeridas para la operación de la planta piloto, por lo anterior se tomó la decisión de diseñar un eyector que se pudiera construir y cumpliera con nuestras condiciones de aplicación en la planta piloto.

#### 3.1 Principios de un Eyector.

Un eyector, eductor o bomba de chorro se refiere a una bomba que no tiene partes en movimiento y que funciona basándose en el movimiento de fluidos en ciertas condiciones controladas. Especialmente, la potencia motivadora se genera a través de una corriente de fluido de alta presión dirigida por el interior de una boquilla diseñada para producir la velocidad más alta posible en el fluido. El chorro resultante de fluido a alta velocidad produce una zona de baja presión en la cámara de mezclado, lo anterior produce que el fluido de succión fluya hacia la cámara, en condiciones ideales hay un intercambio de momentum que produce una corriente uniformemente mezclada con una velocidad intermedia entre fluido motivador y el fluido de succión. La siguiente etapa de eyector es el difusor el cual tiene como función convertir gradualmente la energía del fluido en presión en la descarga, las 3 partes principales de un eyector son la boquilla, el difusor y la cámara de succión dichas partes se observan en la figura 3-1.

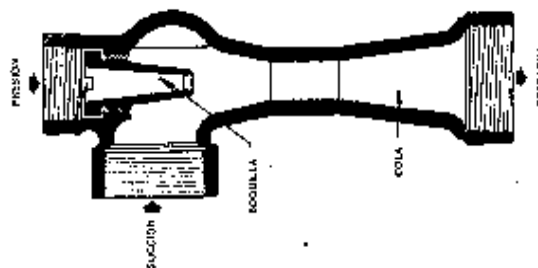


Figura 3-1 Esquema de un eyector.

Es importante definir ciertos términos referentes a terminología de los eyectores:

- Ejector: Nombre con el que se define a las bombas de chorro donde la presión de descarga es intermedia entre las presiones del fluido motivador y la presión de succión.
- Eductor: Se denomina eductor a una bomba de chorro en la cual el fluido motivador es un líquido.
- Inyector: Se denomina inyector a la bomba de chorro en la que un gas básicamente condensable se utiliza para arrastrar un líquido y descargarlo contra una presión superior a la del fluido motivador o al de succión.

### 3.2 Diseño del eyector.

Para el diseño del eyector de tendrá en cuenta una serie de fórmulas y coeficientes tomadas de las bases teóricas de mecánica de fluidos y constantes empíricas o logradas sobre la base de experimentación para longitud y formas que para optimizar o modificar necesariamente se deben probar por medio de prototipos. En nuestro caso se realizó la construcción sobre los resultados del diseño.

#### 3.2.1 Diseño de la boquilla.

Para el diseño de la tobera se tomaron las ecuaciones de continuidad (fórmula 3.1) y la ecuación de Bernoulli (Formula 3-2), Según el esquema de la tobera Figura 3.2



Figura 3-2 Esquema de la boquilla.



$$Q = \frac{P}{4} D^2 V_1 = \frac{P}{4} d^2 V_N \quad (3.1)$$

Donde: D: Diámetro en 1 0.04166 (cm)  
 d: Diámetro en 2 (cm)  
 $V_1$ : Velocidad en 1 (cm/sg)  
 $V_N$ : Velocidad en 2 (cm/sg)  
 Q : Caudal en la tobera 0.035315 (cm<sup>3</sup>/Sg)

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{P_s}{\rho g} + \frac{V_N^2}{2g} \quad (3.2)$$

Donde:  $P_1$ : Presión estática en 1 3024(kg/cm<sup>2</sup>)  
 $P_s$ : Presión estática en la succión 0.691(kg/cm<sup>2</sup>)  
 $V_1$ : Velocidad en la entrada (cm/sg)  
 $V_N$ : Velocidad en la salida (cm/sg)  
 $\rho g$ : Peso específico del fluido motivador 62.4 (kg/cm<sup>3</sup>)

Desarrollando las ecuaciones (3.1) y (3.2) y teniendo en cuenta de a contracorriente en la tobera toda la energía se considera como carga estática de modo que  $V_1$  se cancela, se encuentra el diámetro de la tobera en 2, que permita acelerar el fluido lo máximo posible sin que este llegue a la presión de vapor y se produzca cavitación a la salida de la boquilla el resultado se corrige con un coeficiente de perdidas en boquilla de C= 0.9 tomado de Mecánica de fluidos de Frank White.

La longitud de la reducción se calcula con los diámetros de entrada y salida de la tobera, para estos casos se recomienda un ángulo  $\beta \leq 15^\circ$  y una relación  $l/d = 0.66$  en nuestra tobera utilizaremos un ángulo  $\beta = 14^\circ$ , también utilizado para el difusor.

De esta forma las dimensiones de la boquilla se observan en la tabla:

<b>Nombre de la dimensión</b>	<b>Medida (mm)</b>
Diámetro en 2	1.5
Diámetro en 1	12.7
Longitud de la reducción	20
Longitud de la boquilla	2

Tabla 3-1 Dimensiones de la boquilla

### 3.2.2 Diseño del difusor.

El difusor tiene la forma observada en la figura 3-3, donde como se observa consta de una contracción inicial donde conectada con la succión del eyector, una segunda sección llamada garganta donde el fluido sigue perdiendo velocidad y recuperando presión estática, posteriormente se observa una expansión donde el fluido finalmente llega a sus condiciones finales de flujo.

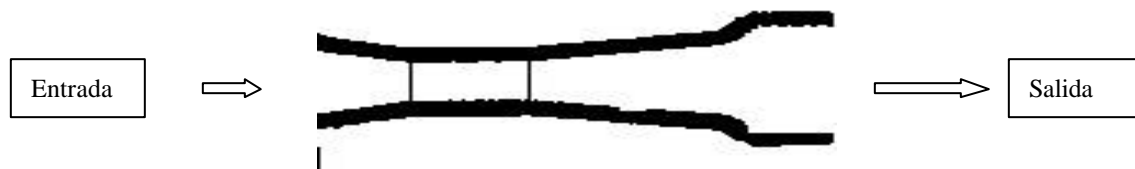


Figura 3-3 Esquema de difusor

Para el diseño del difusor se aplican inicialmente las formulas anteriores de continuidad y Bernoulli

$$\frac{P_s}{\rho g} + \frac{V_T^2}{2g} = \frac{P_d}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} \quad (3.3)$$

Donde:  $P_s$ : Presión estática en succión 0.691(kg/cm<sup>2</sup>)  
 $P_d$ : Presión estática en la descarga 0.351(kg/cm<sup>2</sup>)  
 $V_T$ : Velocidad en la garganta (cm/sg)  
 $V_2$ : Velocidad en la descarga (cm/sg)  
 $\rho g$ : Peso específico del fluido motivador (kg/cm<sup>3</sup>)

$$Q = \frac{\pi}{4} D^2 V \quad (3.4)$$

Donde: D: Diámetro (cm)  
V: Velocidad (cm/sg)  
Q : Caudal en el difusor 0.031 (cm<sup>3</sup>/Sg)

Relación de carga es:

$$R_H = \frac{V_N^2}{V_T^2} \quad (3.5)$$

Las condiciones de arrastres quedan definidas por la ecuación básica de momentum.

$$M_1 V_N + M_s V_s = (M_1 + M_s) V_T$$

Donde

M1= Masa del fluido motivador.

Ms= Masa del fluido de succión despreciable dadas las condiciones.

V<sub>N</sub> = Velocidad en la salida de la boquilla (cm/sg)

V<sub>s</sub> = Velocidad a la entrada de succión

V<sub>T</sub> = Velocidad en la garganta del difusor.

La relación de operación en peso

$$R_w = \frac{M_s}{M_1} = \frac{V_N}{V_T} - 1$$

De la misma forma

Las dimensiones del difusor son:

<b>Nombre de la dimensión</b>	<b>Medida (mm)</b>
Diámetros de la tobera	6
Diámetro de salida	12.5
Longitud garganta	20
Longitud de la salida	40

### 3.3 Fabricación del eyector de vacío.

Con las medidas definidas por el diseño del eyector se procedió a fabricar el eyector por medio de maquinas herramientas, lo cual dio como resultado el dispositivo que se puede observar en la foto 3-1

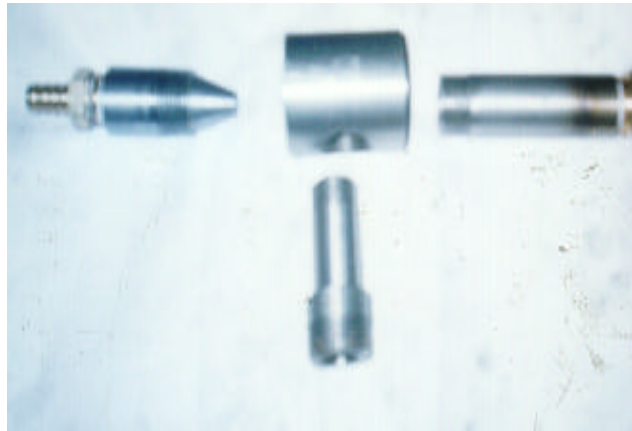


Foto 3-1 Nuevo Eyector.

En el dispositivo observado en la foto3.1, se puede observar a la derecha la boquilla donde se produce la reducción de área y por lo tanto el incremento de velocidad del fluido, esta boquilla se inserta por medio de la rosca en el cuerpo central.

Al lado derecho de la foto se observa el difusor que permite que el fluido recupere sus condiciones iniciales de velocidad y presión, en la parte inferior se observa el conducto de succión desde el tanque de vacío.

Todas las partes se peden acoplar por medio de roscas que permiten un buen ajuste, adicionalmente una ves ensamblado y montado se aplico sello a las uniones para lograr una mejor hermeticidad.

## 4. MONTAJE DE LA PLANTA

Una vez logrados todos los componentes de la nueva planta se inicio el montaje de las mismas.

### 4.1 La Estructura.

El montaje se inicio construyendo una estructura metálica que permitiera montar todos los equipos de la planta piloto y su fijación esto con el fin de darle seguridad a la planta además de permitir su fácil movimiento ya que al estar todos los elementos separados como era su condición inicial, en la cual su desplazamiento se tornaba muy difícil. En la foto 4-1 se observan los equipos montados sobre la estructura metálica, sin la motobomba ni el eyector.



Foto 4-1 Equipos sobre la estructura metálica.

### 4.2 Adecuación de la bomba de calor.

Una vez montados los equipos sobre la estructura se procedió a reacondicionar el sistema de la bomba de calor, para lo cual se descargo el gas refrigerante R22 y se cambio parte de la tubería de cobre que estaba abollada o en mal estado.

Posteriormente y tras verificar que no existían fugas se cargo nuevamente el sistema con el gas R22 y se verifico su condición de operación. Parte de la nueva tubería de cobre se observa en la foto 4-1.

### 4.3 Montaje de la motobomba.

Como la motobomba tiene diámetro de entrada y salida 1 pulgada, se decidió que para la succión se utilizara un tubo de PVC de 1 pulgada al igual para la salida de la motobomba, el tubo de salida solo tiene una longitud de 50 cm, ya que después este llevara una división para enviar el flujo hacia el intercambiador de calor y hacia el eyector.

La conexión entre la división del tubo de PVC de salida de la motobomba y los equipos a los cuales se les suministra agua se realizo con manguera  $\frac{1}{2}$  pulgada de diámetro, la motobomba y las conexiones de la misma se observan en la foto 4-2.



Foto 4.2 Motobomba y sus conexiones.

### 4.4 Montaje del eyector de vacío.

Posterior al montaje de la motobomba se desarrollo el montaje del eyector de vacío diseñado en él capitulo anterior, el ducto de succión se conecta al tanque de vacío por medio de un tubo de acero de  $\frac{3}{4}$  pulgada que tiene una válvula de cheque para retener él vacío.

La entrada del fluido motivador se conecta a la manguera que trae el agua de la motobomba y la salida del difusor se conecta a una manguera que envía el fluido hacia el tanque de agua para refrigeración. El montaje del eyector se observa en la foto 4-2.



Foto 4-2 montaje del eyector.

En la foto 4.2 se observa la conexión de la motobomba acoplada al tanque de agua para condensación y las mangueras al condensador y eyector, adicionalmente se observa en la parte superior el eyector con sus respectivas conexiones y acoplado al tanque de vacío, con estos componentes se desarrollaran las pruebas descritas en el próximo capítulo.

## 5. PRUEBAS Y RESULTADOS.

Una vez terminado el montaje de la planta piloto se procede a realizar las siguientes pruebas.

### 5.1 Medición del consumo de energía

Una vez montado el equipo se realizó la medición del consumo de energía de los equipos en operación, en la figura 5.1 se observa la comparación de los consumos de energía antes y después de la modificación.

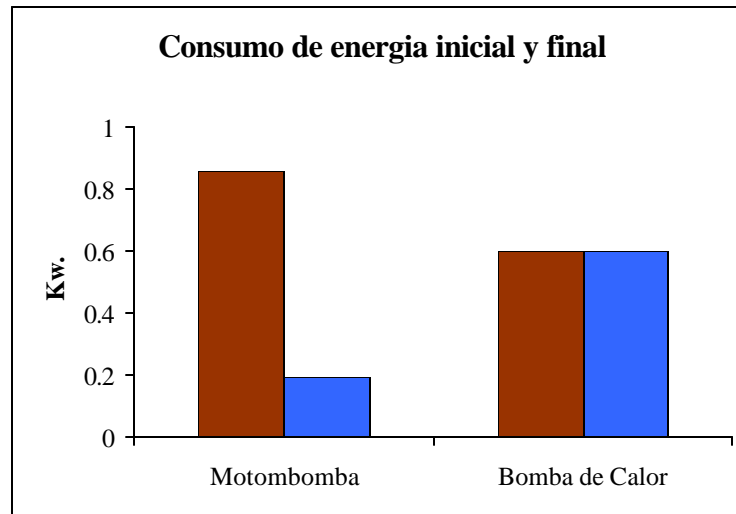


Figura 5.1 Comparación del consumo de energía

### 5.2 Medición de presiones en el tanque de vacío.

Como el tanque de vacío tiene un manómetro fijo de realización seguimiento para observar que presión se obtiene.

Se encontró que el eyector produce vacío de solo 0.5 in Hg, entonces se observa que prácticamente no hay vacío con lo cual el proceso de destilación se dificulta ya que prácticamente se realizaría a presión atmosférica.

Debido a esto se realizaron correcciones en las dimensiones del eyector, inicialmente se verificó la boquilla y se observó que por ella se perdía un 85% del caudal inicial, entonces se modificó el diámetro de salida a 3 mm y con esto se modificaron los diámetros del difusor con una garganta de 7.5 mm y diámetro de salida de 20 mm



Se realizo una nueva prueba y se encontró que la presión llego a 1 in Hg y se encontró una reducción de caudal en la boquilla de 78%.

Nuevamente se modificaron los diámetros iniciando con el de la boquilla pasando a 7 mm y en el difusor los diámetros son garganta 12 mm y salida con diámetro de 20 mm, una vez montado se observo que la presión se mantenía constante en 1 in Hg.

Por los resultados anteriores se decidió buscar un eyector comercial, se encontró que los eyectores en el mercado tienen muy baja demanda, se logro conseguir un eyector a manera de prestamos marca Pedrolo, Italiano del cual no se logro características técnicas solo se pudieron medir los diámetros del difusor y su longitud, el eyector fue prestado por Barnes de Colombia porque era el único de características diferentes a los comerciales este eyector se monto en la planta y funcionando nos dio una presión de vacío de 2 in Hg.

Por ultimo se tomo la decisión de probar con el eyector que estaba trabajando en la planta piloto anteriormente, los resultados fueron una presión de vacío de 4 in Hg. En la tabla 6.1 se encuentra la comparación de presiones obtenidas con los eyectores y la bomba de ¼ Hp y la presión con la bomba de 1 Hp.

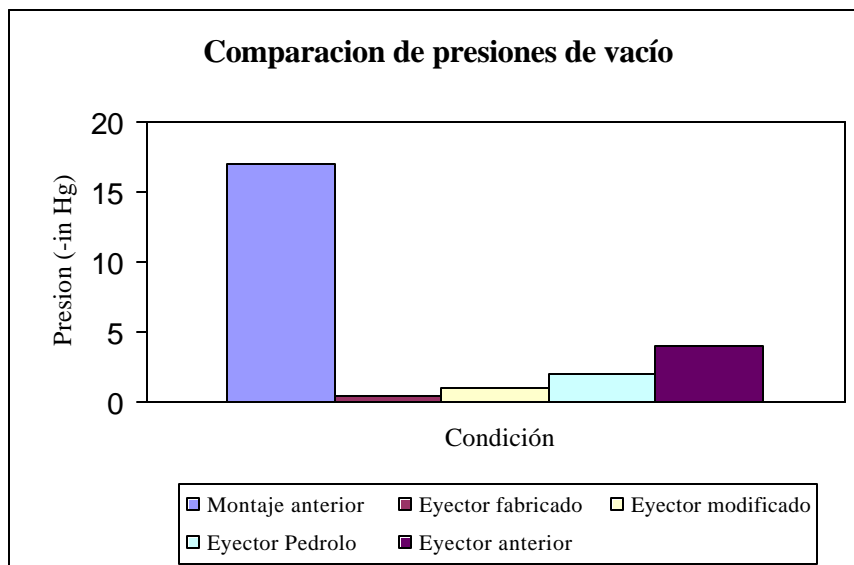


Figura 5-2 Comparación de presiones de vacío obtenidas.

Como se observa las presiones obtenidas en el tanque de vacío son muy bajas con lo cual el proceso de destilación se dificulta ya que se estaría haciendo muy cerca de la presión atmosférica con lo cual el ahorro de energía logrado no sería significativo.

Los bajos niveles de vacío se deben a la baja presión que genera la bomba de ¼ Hp, que según la medición realizada en el capítulo 2 es de 21 Psi.

### 5.3 Presión Requerida La Entrada Del Eyector.

Con la motobomba de 0.19 Kw no se logro el vacío suficiente para el proceso de destilación, por lo tanto es importante conocer que valores de presión se requieren a la entrada del eyector; para se realizaron una serie de pruebas con aire a presión.

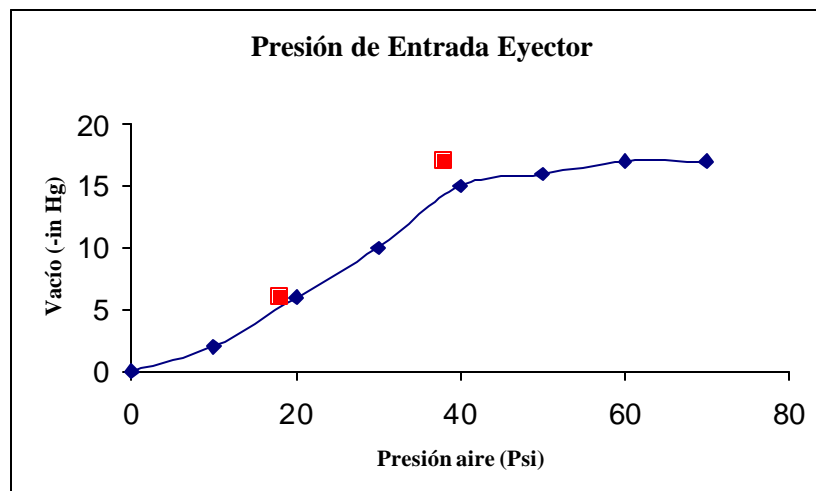


Figura 16. Evaluación de la presión de entrada en el eyector.

Con las pruebas de aire se logro determinar que para logra vacío en el tanque superior a  $-5 \text{ kg/cm}^2$  se requiere de una presión de entrada al eyector superior a  $3 \text{ kg/cm}^2$ , esta presión se puede lograr con una motobomba de bajo caballaje y alta presión.

### 5.4 Comparación de la Operación de las Dos Motobombas.

Con los resultados logrados en las pruebas realizadas con las dos motobombas se realizo la tabla 5.1.

<b>Bomba</b>	<b>Pot (Kw)</b>	<b>Pmax (Psi)</b>	<b>Caudal (L/Sg)</b>	<b>Vacío (-in/Hg)</b>
Peerles	0.86	39	0.81	16
Barnes	0.21	21	0.79	6

Tabla 5.1. Resultados en la Operación de las Dos Motobombas.

En la tabla 5.1, se observa que en aspectos como el caudal las dos bombas operan de manera similar pero en aspectos tan importantes como la presión estática máxima la diferencia supera el 45%, por lo que la presión en el tanque de vacío se cae significativamente con la bomba Barnes por lo cual la producción de agua destilada también se reduce, cabe anotar que estos datos definitivos se obtuvieron con el mismo eyector.

### 5.5 Motobombas Recomendables Para el Proyecto.

Con el fin de lograr un menor consumo de energía y mantener la producción de agua de la planta piloto se realizó un cuadro comparativo (tabla 5.2) con las motobombas que se pueden encontrar en nuestro mercado.

<b>Bomba</b>	<b>Potencia (Kw)</b>	<b>Pres. max. (Psi)</b>	<b>Caudal Max (L/Sg)</b>	<b>Observaciones</b>
Barnes Jet	0.56	54	2.2	Mediano Costo
Barnes Caracol	0.56	43	1.4	Bajo Costo
SAER JET	0.6	65	0.5	Alto Costo.

Tabla 5.2. Motobombas recomendadas para el proyecto.

En el cuadro 5.2 se pueden observar las características básicas de operación de algunas bombas aplicables al presente proyecto, de las cuales podemos concluir.

La bomba SAER JET con un consumo de energía de 0.6 Kw genera una muy alta presión, pero su caudal es muy bajo y esto afectaría al eyector y al condensador,

adicionalmente es muy costosa, lo cual elevaría el valor inicial de la planta de una manera considerable por esto no es viable para la planta piloto.

La bomba Barnes Caracol. Con un consumo de energía de 0.56 Kw, posee un costo y un consumo de energía bajo, pero su máxima presión de operación esta muy ajustada al requerimiento determinado con la prueba de aire y con las perdidas ocasionadas en la planta podría estar por debajo de los requerimientos de presión.

Por ultimo se encuentra la bomba Barnes Jet, que aunque su costo es mediano, posee las condiciones de presión y caudal suficientes para operar en las condiciones requeridas por la planta para generar el vacío necesario y producir los 100 litros de agua al día, que es el objetivo principal de la planta piloto.

## CONCLUSIONES

Utilizando el conjunto de Motobomba Peerles y Eyector Barnes, la planta genera el vacío suficiente para producir aproximadamente 100 litros de agua al día.

Para el caso anterior se puede apagar periódicamente la bomba de calor para lograr un ahorro del 10% en el consumo de energía de la planta.

Con el consumo de energía actual de la planta piloto se puede considerar bajo teniendo en cuenta aplicaciones similares del desarrolladas en otras partes.

De las motobombas recomendadas, se podría decir que la mas cercana a los requerimientos de la planta es la bomba tipo Jet (Barnes) de 0.56 Kw, ya que nos permite a pesar de su mediano costo, obtener las condiciones de presión y caudal requeridos en la planta, adicionalmente se obtendría un 12% adicional del consumo de Energía.

La motobomba Barnes probada no genera la presión suficiente a la entrada del eyector para producir el vacío necesario en la destilación.

El eyector diseñado y fabricado requiere de optimización preferiblemente por medio de modelos, con lo cual se obtendrían mejores resultados pero sigue siendo muy importante la presión de entrada que genere la motobomba.

El montaje de la planta sobre una estructura de todos los componentes de la planta permite una trasladarla muy fácilmente de un lugar a otro, con lo cual se acerca mas a cumplir una de sus objetivos iniciales poder llegar a prestar sus servicios en zonas alejadas o en desastres.

## **RECOMENDACIONES.**

Desarrollar un sistema de extracción de vacío que facilite la extracción del agua destilada y reduzca los tiempos de operación.

La planta ha alcanzado un excelente desempeño el cual se podría mejorar automatizando algunos de sus procesos como:

Control de niveles de al agua para destilar y suministro de la misma.

Implementar un termostato a la bomba de calor para que no sea necesario apagar manualmente por encima de la temperatura de saturación y se prenda cuando este cerca a dicha temperatura.

Desarrollar un control de temperatura del agua para producir vacío y condensación ya que si la temperatura de esta aumenta demasiado, esto reduce la eficiencia de la planta porque condensaría menos agua de la requerida.

Con el fin de dar mucho soporte al desarrollo de la planta es importante realizar pruebas de la calidad y condición del agua a la entrada y salida del proceso, lo mismo que la posible influencia que esta tendría sobre la salud humana.

MIM-2003-1-11

## **ANEXOS**

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.

[1]WHITE Frank. Mecánica de Fluidos, México, Editorial McGraw-Hill, 1979

[2]KARASSIK J. Igor, Manual de Bombas, Diseño, Aplicación, Especificaciones, Operación y Mantenimiento. Editorial McGraw-Hill, México, 1983.

[3]KENNETH Wark Jr , DONALD E. Richards, Termodinámica, Sexta Edición, Editorial McGraw-Hill, España, 2001.

[4]MEDINA Octavio, Rediseño, Instalación y Pruebas de un Sistema de Potabilización al vacío, Universidad de Los Andes, Bogotá, 2002.

[5]CUNNINGHAM R. G., Gas Compression with Liquid Jet Pumps, Journal of Fluids Engineering, Volume 96,