



**UNIVERSIDAD
DEL AZUAY**

FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

**OPTIMIZACIÓN DEL CONDENSADOR DE UN SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA EN MOTORES
DE COMBUSTIÓN PARA DESALINIZAR AGUA**

Proyecto de titulación

Autor: Jhonnatan David Sanchez Rueda

Autor: María José Vera Flores

Director: Ing. Andrés Miguel López Hidalgo

Cuenca – Ecuador

2023

I. DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres, Rómulo Efraín Vera y Fanny Marisol Flores, a mi hermana, Fanny Monserrath Vera, a su esposo Carlos Alfredo Quishpi, a mi sobrino la luz de mi vida, Samuel Quishpi Vera y a mi compañero de tesis Jhonnatan David Sanchez por acompañarme y apoyarme con este proyecto.

María José Vera Flores

II. AGRADECIMIENTO

Agradezco primero a Dios, por darme la oportunidad de culminar mis estudios y otorgarme una familia maravillosa que me brindó su apoyo incondicional, a mi tutor de tesis el PhD. Miguel Andrés López Hidalgo por su guía en el desarrollo de este trabajo, a los ingenieros del taller de ingeniería automotriz Luis Antonio Tapia, Aníbal Rodrigo Jiménez Velez, José Fernando Muñoz y Freddy Norberto Vasquéz por toda la ayuda otorgada, a mis compañeros de carrera y en especial a mi compañero de tesis por trabajar junto a mí y complementarme.

María José Vera Flores

“Optimización del condensador de un sistema de recuperación de energía en motores de combustión para desalinizar agua”

En este trabajo se realizó la optimización del condensador de un sistema de recuperación de energía para un desalinizador; el cual es una alternativa para contribuir al acceso de agua para riego en comunidades de bajos recursos. Para el proceso de desalinización se aprovecha aproximadamente el 30 % de energía calorífica residual de los gases de escape de un motor de combustión interna. Para la optimización del sistema de condensación, se implementó un condensador Graham de vidrio de borosilicato, además de una unidad separadora de vapor diseñada y construida; la cual evita la contaminación del vapor mediante la decantación de la salmuera resultante en el fondo. Los valores de temperatura de los gases de escape dentro del evaporador dependen del motor, con 3500 rpm se alcanzaron 93°C. La eficiencia final del prototipo fue de un 10% en la cantidad de agua tratada, y se obtuvo una reducción de 28,92 gramos de sal por litro de agua, correspondiente a una reducción de la salinidad del 84,41% con respecto a la muestra de agua salada.

Palabras clave: Agua potable, intercambiador de calor, eficiencia energética, desalinización, recuperación de energía.



Ing. Andres Miguel Lopez Hidalgo, PhD.
Director de tesis



Ing. Robert Rockwood Iglesias
Coordinador de la Escuela de
Ingeniería Automotriz



Jhonattan David Sanchez Rueda
Autor



María José Vera Flores
Autor

“Optimization of the condenser of an energy recovery system in combustion engines to desalinate water”

The objective of this research is to optimize the condenser of an energy recovery system for a desalinator. This alternative will contribute to irrigation water access in low-income communities. For the desalination process, approximately 30% of residual heat energy from the exhaust gasses of an internal combustion engine is used. For the optimization of the condensation system, a borosilicate glass Graham condenser was implemented, in addition to a designed and built vapor separator unit; which prevents steam contamination by decanting the resulting brine to the bottom. The exhaust gas temperature values inside the evaporator are depending on the engine with 3500 rpm reaching 93°C. The final efficiency of the prototype was 10% in the amount of treated water, and it obtained a reduction of 28.92 grams of salt per liter of water. It corresponds to a salinity reduction of 84.41% concerning the saltwater sample.

Keywords: Drinking water, heat exchanger, energy efficient, desalination, energy recovery.



Ing. Andrés Miguel López Hidalgo, PhD.
Director of the Degree Project



Ing. Robert Rockwood Iglesias
Coordinator of the School



Jhonnatan David Sanchez Rueda
Author



María José Vera Flores
Author



Índice de contenido

I. DEDICATORIA	2
II. AGRADECIMIENTO	2
III. RESUMEN	3
IV. ABSTRACT	4
V. ÍNDICE DE FIGURAS	5
VI. INTRODUCCIÓN	6
VII. METODOLOGÍA	7
A. MATERIALES	7
B. MÉTODOS	8
C. MUESTRAS	8
D. RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN	8
VIII. CÁLCULOS	8
A. NOMENCLATURA	9
B. ECUACIONES	9
IX. RESULTADOS	11
A. RESULTADOS OBTENIDOS PROYECTO ANTERIOR	11
B. RESULTADOS OBTENIDOS PROYECTO ACTUAL	11
X. CONCLUSIONES	12
XI. RECOMENDACIONES	12
XII. REFERENCIAS	12
XIII. ANEXOS	13
V. ÍNDICE DE FIGURAS	
FIG. 1. PARTES DEL PROTOTIPO PREVIO.	7
FIG. 2. PROTOTIPO MODIFICADO.	7
FIG. 3. CONDENSADOR REFRIGERANTE ESMERILADO DE DOBLE TUBO.	7
FIG. 4. UNIDAD SEPARADORA DE VAPOR.	8
FIG. 5. EVAPORADOR Y SILENCIADOR RECUBIERTOS DE LANA DE VIDRIO.	8
FIG. 6 DIAGRAMA CONEXIONES ENTRE ELEMENTOS DEL DESALINIZADOR	9
FIG. 7 DIAGRAMA UNIDAD SEPARADORA DE VAPOR	10
FIG. 8 DIAGRAMA DE ANÁLISIS CONDENSADOR DE DOBLE TUBO	11
FIG. 9. RESULTADO DE LA PRUEBA 2 DE CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA.	12

Optimización del condensador de un sistema de recuperación de energía en motores de combustión para desalinizar agua

Jhonnatan David Sanchez Rueda
Ingeniería Automotriz
Facultad de Ciencia y Tecnología
Universidad del Azuay
Cuenca, Ecuador.
tush@es.uazuay.edu.ec

María José Vera Flores
Ingeniería Automotriz
Facultad de Ciencia y Tecnología
Universidad del Azuay
Cuenca, Ecuador.
mariajoseverafloraes@es.uazuay.edu.ec

Ing. Andrés Miguel López Hidalgo, Ph.D.
Ingeniería Automotriz
Facultad de Ciencia y Tecnología
Universidad del Azuay
Cuenca, Ecuador.
alopezh@uazuay.edu.ec

Resumen— En este trabajo se realizó la optimización del condensador de un sistema de recuperación de energía para un desalinizador; el cual es una alternativa para contribuir al acceso de agua para riego en comunidades de bajos recursos. Para el proceso de desalinización se aprovecha aproximadamente el 30 % de energía calorífica residual de los gases de escape de un motor de combustión interna. Para la optimización del sistema de condensación, se implementó un condensador Graham de vidrio de borosilicato, además de una unidad separadora de vapor diseñada y construida; la cual evita la contaminación del vapor mediante la decantación de la salmuera resultante en el fondo. Los valores de temperatura de los gases de escape dentro del evaporador dependen del motor, con 3500 rpm se alcanzaron 93°C. La eficiencia final del prototipo fue de un 10% en la cantidad de agua tratada, y se obtuvo una reducción de 28,92 gramos de sal por litro de agua, correspondiente a una reducción de la salinidad del 84,41% con respecto a la muestra de agua salada.

Palabras clave— Agua potable, intercambiador de calor, eficiencia energética, desalinización, recuperación de energía

VI. INTRODUCCIÓN

Considerando que en el planeta el 97% del agua es salada, es decir, posee una alta concentración de sales y que las fuentes de agua dulce son escasas, las tecnologías de desalación son una oportunidad para brindar agua limpia para uso doméstico, agrícola e industrial [1].

Los costos para desalar agua de mar, en concreto los energéticos y económicos se han reducido de un modo significativo en los últimos 30 años, dando como resultado una expansión de estas tecnologías por todas las zonas costeras del mundo con problemas de suministro [2].

Por otro lado, la desalinización es un proceso térmico no reversible que requiere energía para separar sal o agua a partir de agua salada, por lo que se debe aplicar calor y/o trabajo para obtener un fluido con distinta presión o temperatura en comparación con el fluido de entrada [3].

El proceso de desalación y la fuente de energía son consideraciones importantes de la desalación que se deben considerar.

Conviene subrayar que los intercambiadores de calor son dispositivos que permiten la transferencia de energía calórica entre dos fluidos a distinta temperatura. La transferencia de calor de estos dispositivos suele tener convección en cada fluido y conducción a través de la pared que los separa. En particular, podemos analizar dos tipos de intercambiadores de calor, condensadores donde uno de los fluidos se enfría y se condensa conforme fluye a través de ese intercambiador y los evaporadores donde uno de los fluidos absorbe calor y se vaporiza [4].

Los procesos de desalación se pueden clasificar de tres formas: por cambio de fase, tipo de energía que usa y por separación del solvente y soluto. Por cambio de fase se pueden dividir en dos grupos, procesos sin cambio de fase durante el tratamiento y procesos con cambio de fase durante el tratamiento pasando por una fase gaseosa. Por cambio de fase durante el tratamiento, tenemos: compresión de gases, por congelación, térmico multi etapa y térmico multiefecto [3].

Acerca de los condensadores de tubo, se utilizan para obtener muestras por goteo y evitar la pérdida de vapor, existen varios tipos como el condensador Vigreux, Liebig, Graham, Dimroth, Allihn y Friedrichs.

Con respecto a la fuente de energía, en la facultad de Ciencia y Tecnología de la Universidad del Azuay, se desarrolló un prototipo para el tratamiento del agua salada mediante el proceso de evaporación aprovechando la energía térmica disponible en forma de calor que se disipa en el múltiple de escape de los motores de combustión interna. En la Fig. 1 se puede observar las partes del prototipo.

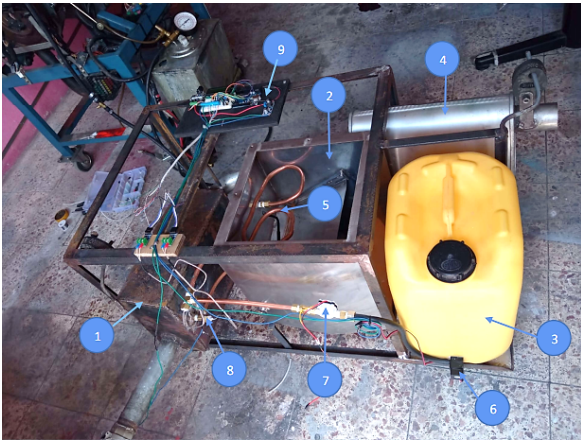


Fig. 1. Partes del prototipo previo.

1. Evaporador
2. Condensador
3. Reservorio de agua salada
4. Silenciador
5. Serpentín del condensador
6. Bomba
7. Sensor de flujo de agua
8. Termocupla tipo K
9. Unidad de control

La energía disponible de los gases de escape varía en función de la capacidad, velocidad y carga del motor, tomando una velocidad constante la energía de escape solo varía en base a la carga en el motor. La energía calorífica disponible en los gases de combustión es de 25 % a 35 % dependiendo del grado de carga [5].

La eficiencia obtenida del prototipo, en pruebas anteriores fue del 2%, por lo que este proyecto propone una variación para mejorar la eficiencia del mismo, la cual consiste en implementar un separador de vapor y un condensador de tipo Graham comúnmente empleado en procesos de destilación; utilizando como refrigerante el agua salada del reservorio que se encontraba a una temperatura promedio de 16° C durante las pruebas, misma que depende de la temperatura ambiente.

En consecuencia, considerando las recomendaciones del proyecto previo, a través del presente estudio se pretende mejorar la eficiencia del prototipo desalinizador de la Universidad del Azuay. La Fig. 2 muestra los cambios en el prototipo, detallando la ubicación del decantador/separador de vapor para evitar la mezcla con la salmuera, el condensador Graham que aumenta la superficie de enfriamiento, el material aislante alrededor del evaporador con el fin de disminuir las pérdidas de calor y la simplificación del circuito eléctrico. (Véase anexos)



Fig. 2. Prototipo modificado.

VII. METODOLOGÍA

A. Materiales

Motor de combustión interna, para la experimentación se utilizó un motor Mazda G6, de 2000 cm³ de cilindrada con una potencia de 139 hp (104kw) a 4700 (rpm). El consumo de combustible en 1/100km es: rural 9.5, urbano 14.8, autopista 11.5.

Se seleccionó un condensador comercial de catálogo cuya ventaja es su disponibilidad, precio y principalmente su material, en específico el de vidrio de borosilicato 3.3 de alta calidad y resistencia térmica, con una longitud de 300 mm, el mismo está compuesto de un tubo externo para el paso del fluido refrigerante, y un tubo interno en forma de espiral el cual permite condensar el vapor. En la Fig. 3 se puede observar el tubo condensador Graham.



Fig. 3. Condensador refrigerante esmerilado de doble tubo.

En la Fig. 4 se observa el separador de vapor, elaborado de aluminio de 2800 cm³, con empaque de amianto, tapa y llave de paso para la decantación de salmuera.

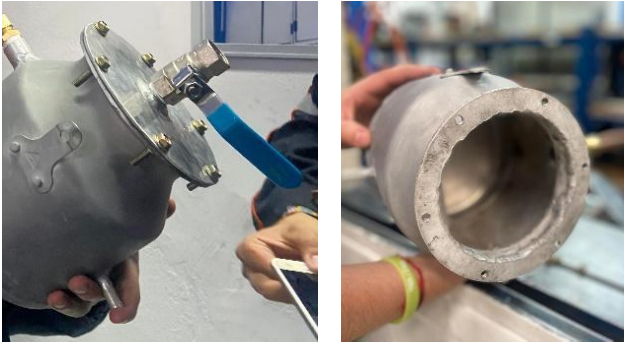


Fig. 4. Unidad separadora de vapor.

En la Fig. 5 se observa el material aislante (Cañuela de lana de vidrio con Foil de aluminio) utilizado en el evaporador del prototipo.



Fig. 5. Evaporador y silenciador recubierto de lana de vidrio.

Se utilizó una batería de 12 V, como fuente de energía para el circuito, regulada con un módulo DC-DC convertidor de voltaje para no quemar ningún componente ni requerir una fuente de energía externa.

En la parte electrónica, se utilizó una tarjeta Arduino UNO conectada a una pantalla LCD 16x2, en la cual 2 sensores termopar tipo k proporcionaron los datos de temperatura de entrada y salida del evaporador, además de, un sensor de flujo de agua YF-S201 que midió el caudal de entrada el cual se puede regular mediante un potenciómetro.

B. Métodos

El diseño de investigación fue experimental, con un enfoque metodológico cuantitativo, el tipo de investigación fue prospectivo y el alcance descriptivo, explicativo. La unidad de análisis es gramos de sal por litro de agua (gr/l), y litros de agua (l).

En primer lugar, al analizar diferentes sistemas de desalinización expuestos en el apartado I, con base en el prototipo previo, se empleó un sistema evaporativo que utiliza una fuente de calor para llevar el agua salada a su punto de ebullición con el fin de separar la sal del agua, el vapor de agua resultante se condensa y de esta manera se obtiene agua con menor concentración de sal.

De manera que el rediseño y la construcción del condensador en el proyecto se basó en un doble sistema de condensación donde la construcción fue en base a los planos diseñados para el decantador/separador de vapor. Con respecto a la selección del condensador comercial se apoyó en las características de los catálogos disponibles en el mercado [6].

Cada prueba en el prototipo consistió en, adaptar la salida de los gases de escape del motor a la entrada del evaporador del prototipo, encender y acelerar el motor hasta obtener una temperatura de 120 a 250°C, encender el prototipo para que una bomba produzca la circulación del agua salada del depósito, recorriendo primero el condensador para refrigerarlo, posteriormente se dirige al evaporador para utilizar la energía calorífica de los gases de escape y cambiar de fase a vapor húmedo, para dirigirse al separador de vapor y separar la salmuera del vapor de agua, dirigiendo el vapor al condensador donde la temperatura desciende debido a la refrigeración del inicio del ciclo y de esta manera, cambiar la fase de vapor a líquido recolectando agua desalinizada.

Los datos obtenidos de los sensores durante las pruebas realizadas de salinidad se comparan obteniendo la media estadística entre ellas y calculando la efectividad del proceso, mediante el uso del software Engineering Equation Solver (EES) para la solución de ecuaciones.

C. Muestras

Para la investigación de laboratorio se deben realizar análisis de agua con el nuevo condensador, para calcular la eficiencia del mismo a través de la comparación de las muestras antes y después del proceso. Comenzando por preparar una muestra base según las especificaciones de agua salina, la misma debe tener un porcentaje de sal entre 30 a 50 gr/l, por lo que en 5 litros de agua se colocó 250 gramos de sal [7].

Se realizaron 2 tipos de análisis en la muestra de agua recolectada, uno de salinidad con una prueba de conductividad eléctrica en laboratorio y otra de cantidad de agua obtenida.

Se tomaron en total de 7 muestras, 3 de la cantidad total del agua tratada, 3 de 100 ml del agua tratada y 1 de 100 ml del agua salada en el depósito inicial para el análisis de calidad de agua. Para calcular el volumen de la muestra total se multiplicó en la primera prueba los 100 ml x Nro. Muestras = 300 ml y en la segunda prueba el volumen de agua obtenido por el número de muestras.

D. Recolección de información

Los autores de este escrito evaluaron la eficiencia del condensador dentro del desalinizador con el agua dulce que sale del condensador, en % de salinidad y cantidad de agua recolectada y la recopilación de datos de sensores.

Se utilizó un análisis de conductividad eléctrica en el laboratorio de química instrumental de la Universidad, datos previos de la investigación y pruebas experimentales en el prototipo desalinizador de la Universidad del Azuay en Cuenca, Ecuador.

VIII. CÁLCULOS

Se busca calcular la energía calorífica que se puede utilizar de los gases de escape para estimar el flujo másico máximo de agua que se podría obtener y finalmente la transferencia de calor en el condensador de doble tubo. Se utilizaron unidades del SI. Se puede ver en la Fig. 6 el diagrama de circulación del fluido.

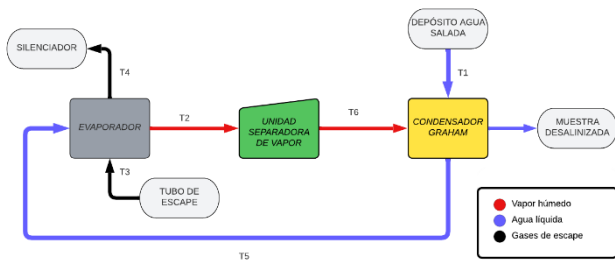


Fig. 6 Diagrama conexiones entre elementos del desalinizador

A continuación, se presenta la nomenclatura de las ecuaciones para el cálculo:

A. Nomenclatura

\dot{Q}_1 = calor sensible

\dot{Q}_2 = calor latente

\dot{Q}_{esc} = energía por unidad de tiempo en gases de escape

\dot{Q}_{H_2O} = energía por unidad de tiempo en agua

\dot{Q}_{pe} = razón de pérdida de calor a través de las paredes del separador de vapor

\dot{Q}_x = razón de aumento de calor del agua salada

$\dot{Q}_{condensador}$ = razón a la que pierde calor el vapor de agua

Cp_{H_2O} = calor específico del agua

$Cp_{H_2O vapor}$ = calor específico del vapor de agua

Cp_{CO_2} = calor específico del dióxido de carbono

h_{vap} = entalpía de vaporización

h_{gt} = entalpía del dióxido de carbono

\dot{m}_{H_2O} = flujo de energía necesario para obtener vapor saturado

saturado

\dot{m}_g = flujo másico necesario para obtener vapor saturado

\dot{m}_{vap} = flujo másico de vapor de agua

T_1 = temperatura del depósito inicial del agua salada

T_2 = temperatura a la salida del evaporador

T_3 = temperatura de entrada de gases de escape

T_{3max} = temperatura máxima de entrada de gases de escape

T_4 = temperatura de salida de gases de escape

T_5 = temperatura entrada al evaporador

T_6 = temperatura salida de la unidad separadora de vapor

T_7 = temperatura salida del tubo interior del condensador

ΔT_{ml1} = diferencia de temperatura media logarítmica en el separador de vapor

ΔT_{ml2} = diferencia de temperatura media logarítmica en el condensador

ω = velocidad angular del motor

Vt = cilindraje del motor

ρg = densidad de los gases de escape

ρvap =

η = eficiencia del motor

i = constante para el motor 0,5

Re = número de Reynolds

Nu = número de Nusselt

U = coeficiente de transferencia de calor total

$A_{tubo\ de\ cobre}$ = área tubo de cobre

$A_{superficial}$ = área superficial del serpentín del condensador

$A_{separador\ de\ vapor}$ = área superficial del separador de vapor

$V_{separador\ vapor}$ = la velocidad del fluido en la unidad decantadora/separadora de vapor

$D_{separador\ vapor}$ = diámetro máximo unidad decantadora/separadora de vapor

$h_{separador\ vapor}$ = coeficiente de transferencia de calor del separador de vapor

μ_{vap} = viscosidad cinemática

k_{vap} = coeficiente de convección

$V_{sal\ evap}$ = la velocidad del fluido a la salida del evaporador

B. Ecuaciones

Las temperaturas que se utilizan para los cálculos, se muestran en la Tabla I, se utilizaron dos instrumentos de medición, el sensor de temperatura del circuito y un pirómetro.

Tabla I. Temperaturas de trabajo

Variable	Temperatura		Instrumento de medición
	°C	°K	
T_1	20	293,15	Pirómetro
T_2	93,54	366,69	Termocupla tipo K

T_3	102	375,15	Pirómetro
T_{3max}	200	473,15	Pirómetro
T_4	71	344,15	Pirómetro
T_5	48,66	321,81	Termocupla tipo K
T_7	37	310,15	Pirómetro

Los valores de las variables que se pueden obtener mediante las propiedades del fluido, datos del prototipo previo y características del diseño de unida decantadora/separadora de vapor y del condensador, se muestran en la Tabla II.

Tabla II. Variables conocidas

Variable	Valor	Unidad
ρ_g	1,1336	$\frac{kg}{m^3}$
Cp_{CO_2}	1,045	$\frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$
h_{vap}	2275,2	$\frac{kJ}{kg}$
Cp_{H_2O}	4,18	$\frac{kJ}{kg \cdot K}$
ρ_{vap}	0,4808	$\frac{kg}{m^3}$
$A_{tubo\ de\ cobre}$	$8,1873 \times 10^{-5}$	m^2
$A_{separador\ de\ vapor}$	0,254	m^2
$D_{separador\ vapor}$	0,18	m
$A_{superficial}$	0,2922	m^2
μ_{vap}	$1,204 \times 10^{-5}$	$\frac{kg}{m \cdot s}$
k_{vap}	0,0244	$\frac{W}{m \cdot ^\circ C}$

El calor necesario para elevar la temperatura del agua desde la temperatura ambiente hasta la temperatura de líquido saturado se denomina calor sensible y se muestra en la ecuación (1).

$$\dot{Q}_1 = \dot{m}_{H_2O} * Cp_{H_2O} * (T_2 - T_1) \quad (1)$$

El calor necesario para cambiar de estado se denomina calor latente y se expresa mediante la ecuación (2).

$$\dot{Q}_2 = \dot{m}_{H_2O} * h_{vap} \quad (2)$$

El calor total para el proceso de calentamiento por lo tanto se puede expresar mediante la ecuación (3).

$$\dot{Q}_{H_2O} = \dot{Q}_1 + \dot{Q}_2 \quad (3)$$

Se puede calcular el flujo másico de gases de escape con la ecuación (4), mediante las características del motor empleado durante las pruebas y las propiedades tomadas de tablas termodinámicas a T_{3max} de los gases de CO_2 , como único gas de análisis.

$$\dot{m}_g = \omega * Vt * pg * \eta * i \quad (4)$$

Para calcular la transferencia de calor de los gases de escape hacia el agua salada, se utiliza la ecuación (6) la cual requiere el valor del flujo másico y la entalpía de los gases de escape, en este cálculo se utiliza una eficiencia de 25%. La entalpía de los gases de escape se calcula con la ecuación (5) con la temperatura T_{3max} y del calor específico de los gases de escape.

$$h_{gt} = T_3 * Cp_{CO_2} \quad (5)$$

$$\dot{Q}_{esc} = \dot{m}_g * h_{gt} * 0,25 \quad (6)$$

Se realiza un balance térmico, para saber el máximo flujo másico de agua que se podría usar según la disponibilidad de energía en los gases de escape y para este cálculo se utiliza la ecuación (7) y la (8). Se utiliza la entalpía de vaporización según la tabla termodinámica de propiedades del agua saturada con la temperatura T_2 . El calor específico del agua se tomó de la tabla termodinámica de propiedades de líquidos, sólidos y alimentos comunes mediante una interpolación.

$$\dot{Q}_{H_2O} = \dot{Q}_{esc} \quad (7)$$

$$\dot{m}_{H_2O} = \frac{\dot{Q}_{esc}}{Cp_{H_2O} * (T_2 - T_5) + h_{vap}} \quad (8)$$

Se utiliza un sistema cerrado, por lo que no existen pérdidas de masa, en consecuencia, el flujo másico de entrada a la unidad decantadora/separadora de vapor es el mismo que a la salida del evaporador \dot{m}_{H_2O} como se ve en la ecuación (9). Con este valor se calculó la velocidad del fluido a la salida del evaporador en la ecuación (10) y la velocidad del fluido en la unidad decantadora/separadora de vapor, ecuación (11).

$$\dot{m}_{vap} = \dot{m}_{H_2O} \quad (9)$$

$$V_{sal\ evap} = \frac{\dot{m}_{vap}}{\rho_{vap} * A_{tubo\ de\ cobre}} \quad (10)$$

$$V_{separador\ vapor} = \frac{A_{tubo\ de\ cobre} * V_{sal\ evap}}{A_{separador\ de\ vapor}} \quad (11)$$

Las propiedades del vapor tomados del libro de Cengel [4] se utilizaron en la ecuación (12) para calcular el número de Reynolds y determinar el tipo de flujo, además, con el número de Nusselt para para tubos cilíndricos de convección interna $N_u = 3,66$, encontramos el coeficiente de transferencia de calor del separador de vapor ecuación (13).

$$R_e = \frac{\rho_{vap} * V_{separador\ vapor} * D_{separador\ vapor}}{\mu_{vap}} \quad (12)$$

$$h_{separador\ de\ vapor} = \frac{N_u * k_{vap}}{D_{separador\ vapor}} \quad (13)$$

La resistencia a la conducción de la unidad separadora de vapor es despreciable, de modo que la temperatura superficial en el interior del mismo es igual a la temperatura del vapor de agua en su interior. Con el coeficiente de transferencia de calor del separador de vapor, se calculó la temperatura de salida T6 con la ecuación (14), al mismo tiempo que las pérdidas de calor a través de las paredes del

condensador, ecuación (16). Para calcular \dot{Q}_{pe} , se utilizó la diferencia de temperatura media algorítmica, ecuación (15).

$$T_6 = T_1 - (T_1 - T_2) * e^{-\left(\frac{h_{\text{separador de vapor}} * A_{\text{superficial}}}{m_{\text{vap}} * Cp_{H2O \text{vap}}}\right)} \quad (14)$$

$$\Delta T_{ml1} = \frac{T_6 * T_2}{\ln\left(\frac{T_1 - T_6}{T_1 - T_2}\right)} \quad (15)$$

$$\dot{Q}_{pe} = h_{\text{separador de vapor}} * A_{\text{superficial}} * \Delta T_{ml1} \quad (16)$$

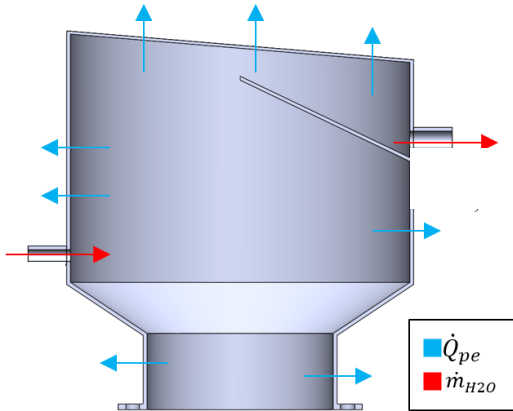


Fig. 7 Diagrama unidad separadora de vapor

Finalmente, en el condensador de doble tubo se analiza la interacción del agua a temperatura ambiente y el vapor que sale de la unidad separadora de vapor, se calculó la razón de pérdida de calor del vapor de agua ecuación (22).

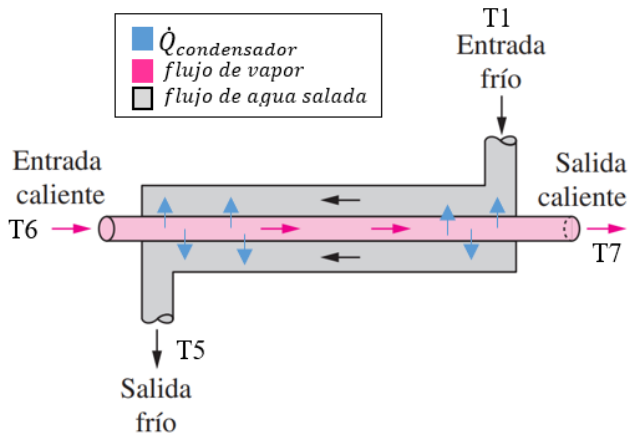


Fig. 8 diagrama de análisis condensador de doble tubo

$$\dot{Q}_x = \dot{m}_{H2O} * Cp_{H2O} * (T_5 - T_1) \quad (17)$$

$$U = \frac{\dot{Q}_x}{A_{\text{superficial}} * \Delta t} \quad (18)$$

$$\Delta T_1 = T_6 - T_5 \quad (19)$$

$$\Delta T_2 = T_7 - T_1 \quad (20)$$

$$\Delta T_{ml2} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} \quad (21)$$

$$\dot{Q}_{\text{condensador}} = U * A_{\text{tubo interior}} * \Delta T_{ml} \quad (22)$$

IX. RESULTADOS

Los resultados de los cálculos se muestran en la Tabla III.

Tabla III. Resultados obtenidos mediante cálculos

Variable	Valor	Unidad
\dot{m}_g	0,373	$\frac{kg}{s}$
h_{gt}	209	$\frac{kJ}{kg}$
\dot{Q}_{esc}	19,489	kW
\dot{Q}_{H2O}	19,489	kW
\dot{m}_{H2O}	0,007	$\frac{kg}{s}$
\dot{m}_{vap}	0,007	$\frac{kg}{s}$
$V_{\text{sal evap}}$	117,82	$\frac{m}{s}$
$V_{\text{separador vapor}}$	0,37	$\frac{m}{s}$
R_e	2727,4	-
$h_{\text{separador de vapor}}$	0,496	$\frac{W}{m^2 * ^\circ C}$
T_6	93,36	$^\circ C$
ΔT_{ml1}	73,44	$^\circ C$
\dot{Q}_{pe}	0,0106	kW
\dot{Q}_x	3,80	kW
U	3,80	$\frac{W}{m^2 * ^\circ C}$
ΔT_1	44,7	$^\circ C$
ΔT_2	17	$^\circ C$
ΔT_{ml2}	28,652	$^\circ C$
$\dot{Q}_{\text{condensador}}$	3,71	kW

A. Resultados obtenidos proyecto anterior

La eficiencia del sistema relacionado con la cantidad de agua dulce obtenida mediante el proceso evaporativo del prototipo antecedente se indica en la Tabla IV.

Tabla IV. Eficiencia inicial de referencia.

Prueba	Volumen	Tiempo	Caudal	Cantidad de agua tratada	Eficiencia
	cm^3	min	l/min	cm^3	%
1	5000	9,78	0,51124 7	159,6	3,192
2	5000	12,66	0,39494 5	176,5	3,53

B. Resultados obtenidos proyecto actual

La cantidad de agua dulce obtenida mediante el proceso evaporativo del prototipo se analizó en 2 muestras, que se indican en la Tabla V.

Tabla V. Pruebas de cantidad de agua.

Prueba	Volumen	Tiempo	Cantidad de agua tratada	Eficiencia
	cm ³	min	cm ³	%
1	5000	60	500	10
2	5000	60	500	10
3	5000	60	500	10

Con la prueba de sólidos disueltos totales (SDT) el porcentaje de salinidad se analizó en 3 muestras: 1, 2 y 3 de agua obtenida en el prototipo. La concentración de sal en el agua de entrada es de 34.26 gramos de sal/litro de agua, los valores se indican en la Tabla VI.

Tabla VI. Pruebas de salinidad de agua por conductividad eléctrica.

Muestra	Volumen	Densidad	Conductividad eléctrica	SDT
	cm ³	kg/m ³	μS/cm	gr/l
1	100	1004	8900	5,34
2	100	1013	29600	17,76
3	100	1013	11160	5,58

X. CONCLUSIONES

Los principales sistemas estudiados de desalación de agua de mar consisten en cambios de fase, entre ellos se encuentra la desalinización por compresión de gases, MEP, MSF, y por congelación. El proceso de desalación que se utilizó fue de cambio de fase, mediante la evaporación del agua salada y condensación del vapor de agua con bajo porcentaje de sal.

Se obtuvo una eficiencia del 10% con salinidad promedio de $9,56 \pm 8,03$ gramos de sal/litro de agua y cantidades recolectadas de 0,5 l/h. Se debe estabilizar el sistema de control de caudal de agua para disminuir la dispersión de los resultados y que la muestra obtenida de agua sea más representativa.

Por otro lado, se planteó obtener agua para uso agrícola, la cual tiene como restricción poseer un SDT inferior a 2 gramos de sal /litros de agua [7].

Con base en esta norma, el agua tratada no aplica como agua para riego, pero se redujo el porcentaje de salinidad en un 60% como se ve en el resultado en milsiemens/cm de la prueba de conductividad eléctrica de la Fig. 9. Sin embargo, el prototipo llegó a tener una mejora significativa en lo referente a la eficiencia.

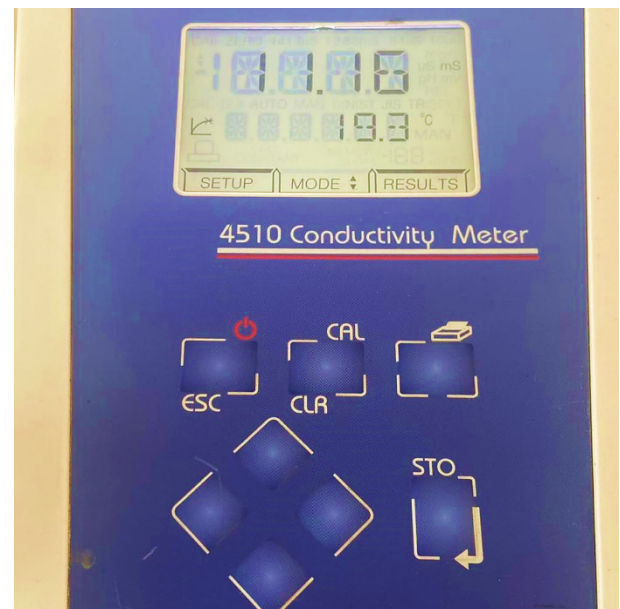


Fig. 9. Resultado de la prueba 2 de conductividad eléctrica.

XI. RECOMENDACIONES

Como recomendaciones, se debe enfocar el circuito eléctrico al control de la bomba de agua, con la programación adecuada para regular el caudal en base a la temperatura del agua que refrigera el condensador, y decantar automáticamente la salmuera en intervalos de tiempo para que no requiera ser manual y se reduzcan las pérdidas de agua, es decir que sea constante. Se considera que con estas modificaciones se podrá obtener agua con una concentración de sal menor a lo que dice la norma para agua de riego que es de menos de 2 gramos de sal/litro.

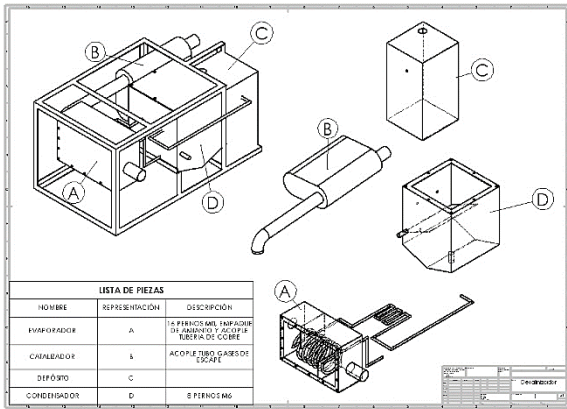
El evaporador puede rediseñarse para mejorar la transferencia de calor y aprovechar de mejor manera el calor residual de los gases de escape.

XII. REFERENCIAS

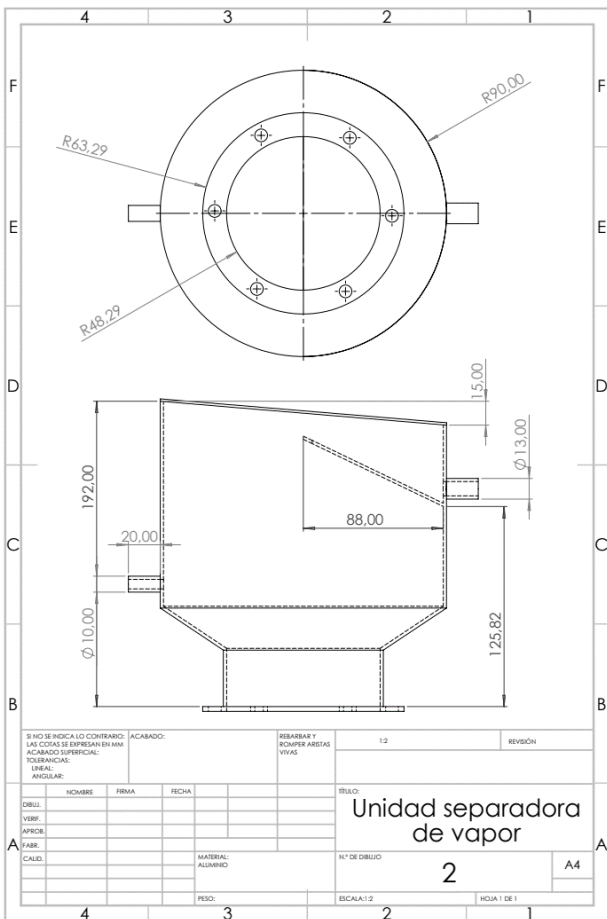
- L. Zarza and E. Muñoz, “Conseguir hacer proyectos más sostenibles y ahorrar en costes son puntos clave en la desalación” | iAgua,” Apr. 04, 2022. <https://www.iagua.es/noticias/almar-water-solutions/conseguir-hacer-proyectos-mas-sostenibles-y-ahorrar-costes-son-puntos>
- A. Martins, “¿Puede la desalinización ser la solución para la crisis mundial del agua? - BBC News Mundo,” *BBC Mundo*, Mar. 22, 2017. <https://www.bbc.com/mundo/noticias-39332148>.
- A. Carlos *et al.*, “Para obtener el grado de MAESTRO EN OPTOMECASTRÓNICA,” 2018.
- Y. Cengel, *Transferencia de Calor y Masa*, Tercera. México: McGraw-Hill Interamericana, 2007.
- K. S. Maheswari, K. Kalidasa Murugavel, and G. Esakkimuthu, “Thermal desalination using diesel engine exhaust waste heat — An experimental analysis,” *Desalination*, vol. 358, pp. 94–100, Feb. 2015, Doi: 10.1016/J.DESAL.2014.12.023.
- Multiciencias, “Materiales de laboratorio-vidrio”, 2021. [En línea]. Disponible en: www.multiciencias.com
- NTE INEN 1108, “Agua potable requisitos”, Quito, jun. 2011.

XIII. ANEXOS

[1] Plano de ensamblaje prototipo previo.



[2] Plano de construcción unidad separadora de vapor.



[3] Plano de referencia condensador de vidrio comercial.

