



# **Diseño y Construcción de un Sistema Desalinizador a través de un Proceso de Gasificación**

Proyecto de Graduación  
para obtener el título de  
Ingeniera Agrónoma  
con el grado académico de  
Licenciatura en Ciencias Agrícolas

Guácimo, Limón, Costa Rica

2017







## Resumen

La escasez de agua a nivel mundial es una problemática que afecta la calidad de vida de las personas. Se intensifica en zonas costeras donde este recurso es abundante pero por su condición no favorable, limitado para uso y consumo. Con el fin de solucionar este problema, se diseñó y construyó un sistema desalinizador de agua que comprende el uso de energías renovables y técnicas de desalinización. Este sistema, de aproximadamente \$ 420 de costo, se conformó con un gasificador *updraft* que se alimentó con fibra de coco para la obtención de energía y un mecanismo desalinizador de agua de mar. La evaluación del sistema se basó en la prueba de tres tipos de fibra: natural (T1), medio (T2) y chips (T3); en conjunto con el agua transformada a partir de la energía proporcionada por cada una. En dichas pruebas se consideró la temperatura y tiempos de gasificación para la fibra y los niveles de pH, Na, demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y demanda química de oxígeno (DQO) como parámetros de calidad del agua entrante y saliente. Los resultados de este proyecto respecto a los tiempos de gasificación correspondieron a 10 min en T1, 78,5 min en T2 y 48 min en T3, siendo los dos últimos los mejores tipos en esta categoría. La cantidad de agua saliente fue de 40 mL en el T1, 888,3 mL en el T2 y 370 mL en el T3, donde el T2 destacó como el mejor. En lo referente a Na, el agua saliente de las pruebas fue de 113,45 mg/L en el T2 y 16,02 mg/L en el T3; el T1 no produjo cantidad suficiente de muestra para analizar este parámetro. Los niveles de pH, DBO y DQO en todas las pruebas no cumplieron con los valores permitidos de calidad de agua.

**Palabras clave:** gasificación, desalinización, energía, demanda bioquímica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), fibra de coco, gasificador *updraft*.

## **Abstract**

The worldwide shortage of clean water is a problem that affects the quality of life of people. This situation is more severe in coastal areas where even though water is abundant, but not consumable due to its high salt content. To tackle this problem, a water desalination system was designed and constructed by incorporating condensation and gasification techniques. The desalination experiments were performed by using three types of coconut fibers: natural (complete husk, T1), medium sized (T2) and small sized chips (T3). The quality of water was obtained by analyzing the pH levels, sodium (Na) content, biochemical oxygen demand (BOD) and chemical oxygen demand (COD). The times of gasification for different types of coconut fibers are as follows 10 min for the treatment T1, 78,5 min for T2 and 48 min for T3, with T2 and T3 providing the best results in this category. In regards to the amount of water obtained after the treatments were 40 mL in T1, 888,3 mL in T2 and 370 mL in T3, where T2 stood out as the best. As for the Na content of the treated water, measurements were 113,45 mg/L in T2 and 16,02 mg/L in T3; while T1 did not produce a measurable sample to analyze the Na content. This desalination system costed 420 USD to construct with respect to the cost of materials in Costa Rica. The pH, BOD and COD levels in all tests did not meet the permitted water quality values.

**Key words:** gasification, desalination, energy, biochemical oxygen demand (BOD), chemical oxygen demand (COD), coconut fiber, updraft gasifier.

## Lista de Contenido

	Página
<b>Resumen</b> .....	<b>v</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>vi</b>
<b>1 Introducción</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Objetivos</b> .....	<b>4</b>
2.1    Objetivo General.....	4
2.2    Objetivos Específicos .....	4
<b>4 Metodología</b> .....	<b>5</b>
4.1    Localización del Proyecto.....	5
4.2    Propuesta de Diseño .....	5
4.3    Construcción.....	9
4.3.1    Gasificador <i>updraft</i> .....	9
4.3.2    Mecanismo desalinizador .....	10
4.3.3    Estructura de soporte .....	11
4.4    Materia Prima .....	11
4.4.1    Fibra de coco .....	11
4.4.2    Agua de mar .....	13
4.5    Diseño Experimental .....	14
4.6    Modalidad de Pruebas.....	14
4.7    Análisis Químico.....	17
<b>5 Resultados y Discusión</b> .....	<b>18</b>
5.1    Diseño y Construcción.....	18
5.2    Tipo de Fibra de Coco .....	20
5.3    Calidad del Agua .....	24
5.4    Conclusiones .....	28
5.5    Recomendaciones.....	29
<b>6 Lista de Referencias Bibliográficas</b> .....	<b>30</b>
<b>7 Anexos</b> .....	<b>33</b>
7.1    Anexo 1. Costos de construcción del sistema desalinizador. ....	33
7.2    Anexo 2. Esquema de las zonas de descomposición térmica de la biomasa en el gasificador. ....	33
7.3    Anexo 3. Agua saliente de las pruebas con repeticiones por tratamiento. ....	33
7.4    Anexo 4. Resumen del análisis químico del testigo y los tres tratamientos. ....	34
7.5    Anexo 5. Imagen de la sal resultante de la prueba con T2. ....	34
7.6    Anexo 6. Datos de la prueba de temperatura en quemador de todos los tratamientos. ....	34
7.7    Anexo 7. Diseño tridimensional del prototipo recomendado con modificaciones en el sistema desalinizador propuesto.....	35



## 1 Introducción

El agua es el componente universal de vital importancia para el ser humano y el medio ambiente, por esta razón desde tiempos antiguos hasta el momento se han buscado técnicas para la adquisición y regulación de este recurso. El 97% del agua en el planeta se encuentra en los océanos y mares, lo cual garantiza aparentemente una reserva inagotable. No obstante, se conoce que debido a la condición compositiva de este recurso su disponibilidad es de carácter limitado. Por su parte, la cantidad restante corresponde a la fracción de agua dulce, la cual se encuentra distribuida en agua subterránea, lagos y ríos, y glaciares y casquetes polares. Estas fuentes han sufrido una serie de consecuencias como resultado de la contaminación generada a partir de los seres humanos y los ciclos naturales de vida de los demás seres vivos. Haciendo énfasis en dichas consecuencias, se considera principalmente las diversas condiciones no aptas para el consumo de la misma en su totalidad; razón suficiente por la cual el ser humano se ha visto en la necesidad de tratarla previamente a su uso y/o consumo (Borja, 2011).

Entrando en contexto del tratamiento otorgado al agua de consumo humano, se tiene la potabilización, la misma que corresponde a la transformación de este componente en condiciones inocuas, de manera que su composición no ocasione efectos perjudiciales que incidan en la salud humana. Sin embargo, la UNESCO afirma en el 2013 que a pesar de conocer el tratamiento mencionado, aún existe escasez de agua potable. Irónicamente esta escasez se da mayormente en zonas que constan de abundantes recursos de agua procedentes del mar o de pozos subterráneos, los mismos que con el paso de los años se han ido salinizando. Alrededor del mundo la población con esta problemática recurre a tecnologías que se encuentren a su alcance y que al mismo tiempo sean asequibles en cada una de las regiones de donde provienen. Es así que hasta el 2013, más de 150 países emplearon la desalinización de agua de mar con la finalidad de solventar sus necesidades básicas y establecer una alternativa para la obtención de agua para su consumo.

Generalmente los sistemas desalinizadores utilizan energía que en su mayoría se basan en las de tipo convencional, las mismas que evidencian un alto consumo energético intensificando de forma constante las emisiones de CO<sub>2</sub>, esto como producto del excesivo uso de hidrocarburos empleados para su funcionamiento (Borja, 2011). Es así que actualmente existen sistemas en donde el uso de energías renovables es posible, tal es el caso de Estados Unidos mencionado por Lamela (2004), en donde indica la utilización de plantas desalinizadoras que emplean energía eléctrica proveniente de un proceso de gasificación. Este proceso utiliza la biomasa correspondiente a residuos orgánicos que provienen de zonas urbanas, los cuales son fuentes de energía que con frecuencia se desperdician desmesuradamente sin concederle aprovechamiento alguno.

A manera de historia sobre el uso de las energías limpias, IDAE (2007a) establece que el primer combustible empleado por el hombre fue la biomasa, la misma que se define como: “toda materia orgánica susceptible de aprovechamiento energético que a corto plazo puede ser

básica en nuestra sociedad, tanto desde el punto de vista energético y ambiental, como para el desarrollo socioeconómico de las zonas rurales”. Las fuentes de esta varían entre si dependiendo de su origen y la manera en cómo fueron producidas. Es así que se denomina biomasa residual a aquella que es producida en explotaciones agrícolas, forestales o ganaderas principalmente, sin embargo también abarca los residuos de origen orgánico generados en las industrias y sectores urbanos (Fernández *et al.*, 2015).

La energía de biomasa se puede obtener por varios procesos según IDAE (2007b), entre los cuales se encuentra la gasificación, la misma que corresponde a una fase termoquímica en la que el sustrato que contiene carbón como elemento, se transforma en gas de síntesis o *syngas* debido a una serie de reacciones que se dan por la presencia de un agente gasificante, en el mayor de los casos el aire. Este último en conjunto con una alta ausencia de oxígeno generan el *syngas* mediante la transformación de la celulosa en hidrocarburos más ligeros, incluso en monóxido de carbono e hidrógeno. La aplicación de este proceso se justifica con la utilización del gas producido como fuente de energía que interfiere de manera positiva en el uso de energías no convencionales.

En el proceso de gasificación se puede llegar a convertir entre un 60 y 90% de la energía proporcionada por la biomasa en energía presente en el gas que se genera. Existen dos tipos de gasificación: directa e indirecta. La primera corresponde al uso de aire u oxígeno para producir calor mediante reacciones exotérmicas; y por su parte la segunda hace referencia a la transferencia de calor desde el exterior hacia el reactor. La gasificación de biomasa ha sido aplicada desde la Segunda Guerra Mundial, en donde al final de la misma y a causa del bajo costo de los combustibles fósiles y desconocimiento técnico de esta tecnología se fue reemplazando considerablemente (Reed y Das, 1988).

Tomando como referencia nuevamente a la UNESCO (2013), se comenta que la energía que se obtiene a partir de biomasa forma parte de las energías denominadas renovables, las cuales hasta ese año proveían el 17 % de la energía primaria a nivel mundial y las “nuevas renovables” contribuyeron con un 2 % del total. Esta fuente energética debido a su naturaleza renovable y no contaminante establece una implicación positiva en la dependencia del uso de energías fósiles. Lo cual se fundamenta en que la biomasa obtiene su energía por parte del sol durante la fotosíntesis y su poder calorífico depende de la conversión de compuestos inorgánicos a orgánicos que esta pudo lograr durante dicho proceso (IDAE, 2007a).

El uso de energía proveniente de fuentes renovables en sistemas desalinizadores contribuye de manera positiva con distintos enigmas ambientales que la sociedad ha desarrollado a través de los años. Por este motivo Lamela (2004), menciona que la aplicación de este tipo de energía mediante un proceso de gasificación cumple con varios objetivos que dan solución a situaciones complejas de la realidad humana y medio ambiental; así como el abastecimiento de agua y tratamiento de residuos sólidos de origen orgánico.

Con la finalidad de exponer con detalle uno de los principios que constituyen la base teórica fundamental de este proyecto y tomando como mención lo escrito anteriormente, se alude a la

RAE por medio de la UNESCO (2013), para definir el término desalinización como aquel proceso que consiste en la acción de remover la sal del agua. Esta técnica constituye uno de los principales medios para acrecentar la oferta de recursos hídricos que generan un incremento y disponibilidad de agua dulce (Borja, 2011).

Actualmente existen sistemas desalinizadores que se basan en cuatro grandes grupos correspondientes a procesos de evaporación, procesos de cristalización, procesos de membranas selectivas y procesos varios. De los cuales y para efecto de interés de este proyecto, se hace énfasis en los tratamientos que conlleven o involucren el proceso de evaporación. Los procesos de evaporación en términos generales, se basan comúnmente en obtener a partir del vapor provocado por una solución salina, agua prácticamente pura como producto de la condensación del mismo (Casero, 2007).

Entre los tratamientos que aplican este proceso, se encuentran: destilación flash múltiple (MSF), destilación múltiple efecto (MED) y destilación con compresión de vapor (CV) (Dévora *et al.*, 2012). Estos tratamientos, someten el agua a altas temperaturas y a través de varios procesos de evaporación y condensación, obtienen el producto deseado. Claramente conllevan un alto consumo energético puesto que ocurren a gran escala y por un lapso de tiempo determinado. Según Casero (2007), indica que los tratamientos como MSF y MED realizan el proceso de condensación a una presión constante a comparación del CV, el cual logra el proceso a temperatura constante. Esto implica que los requerimientos energéticos varíen entre sí dependiendo del tratamiento que se desee asignar para la adquisición de agua con contenido bajo en sal.

La aplicación de un enfoque integral en energías renovables sugiere un menor impacto al ambiente y por ende beneficios ante la solución a la problemática del cambio climático. Es así que este proyecto contribuye con la disponibilidad de fuentes de agua para el uso y consumo humano, a partir de la desalinización del recurso agua basada en los principios de los tratamientos térmicos citados previamente.

Hoy en día no existen sistemas que asocien las tecnologías expuestas anteriormente a pequeña escala y de forma directa, es por ello que el objetivo principal de este proyecto fue el de diseñar y construir un sistema desalinizador que utilice energías renovables no convencionales para su funcionamiento, considerando la fibra de coco como biomasa.

## **2 Objetivos**

### **2.1 Objetivo General**

Construir un sistema desalinizador que utilice energías renovables no convencionales para su funcionamiento.

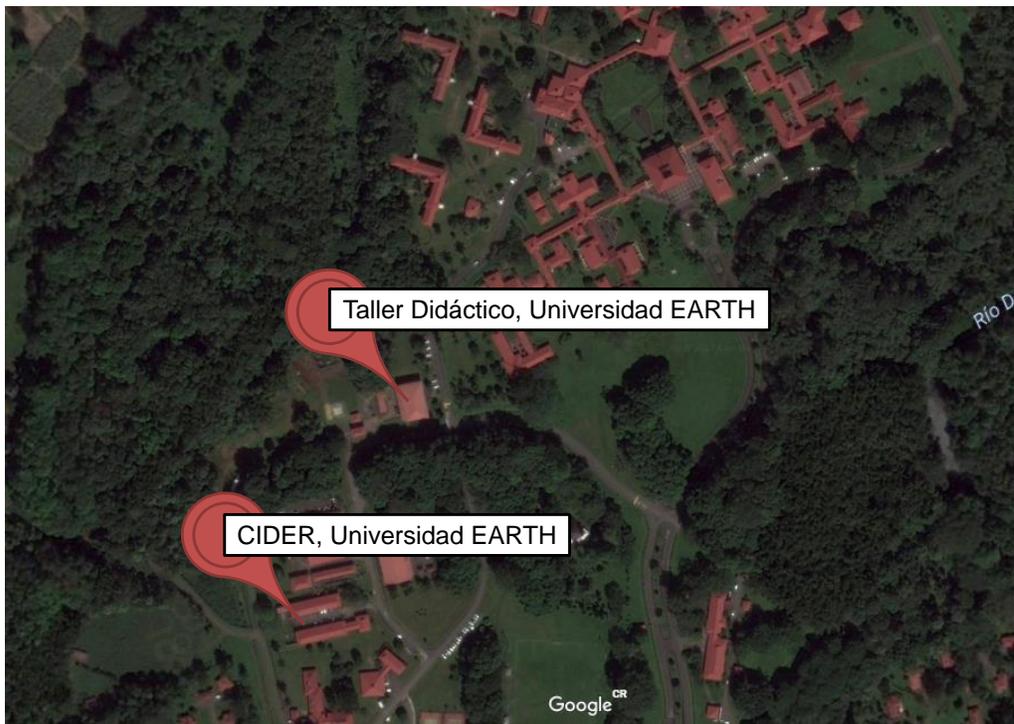
### **2.2 Objetivos Específicos**

- Proponer un diseño de desalinización y fácil construcción que emplee energía proveniente del proceso de gasificación.
- Determinar el tipo de fibra de coco más adecuado para un óptimo proceso de gasificación.
- Evaluar la eficiencia del proceso de desalinización mediante análisis químico de la calidad del agua entrante y saliente.

## 4 Metodología

### 4.1 Localización del Proyecto

El proyecto se efectuó en la Universidad EARTH, Las Mercedes, Guácimo, Limón, Costa Rica. La localización geográfica del Taller Didáctico en donde se llevó a cabo la etapa de construcción, se encuentra entre las coordenadas a latitud  $10^{\circ}13'05''$  N y longitud  $83^{\circ}35'37''$  O (Google Earth, 2016a). Por su parte, la evaluación de funcionamiento del sistema se dio en el Centro de Investigación y Desarrollo de Energías Renovables (CIDER), el cual se ubica entre las coordenadas a latitud  $10^{\circ}12'59''$  N y longitud  $83^{\circ}35'41''$  O. Ambos lugares se visualizan de manera espacial en la Figura 1. La temperatura promedio anual de la zona es de  $25^{\circ}\text{C}$ , con una humedad relativa promedio anual de 85 %, precipitación promedio anual de 3687 mm y elevación de 36 msnm (Universidad EARTH, 2016).



**Figura 1.** Mapa con localización del Taller Didáctico y CIDER en el campus de la Universidad EARTH, Guácimo, Costa Rica (Google Earth, 2016b).

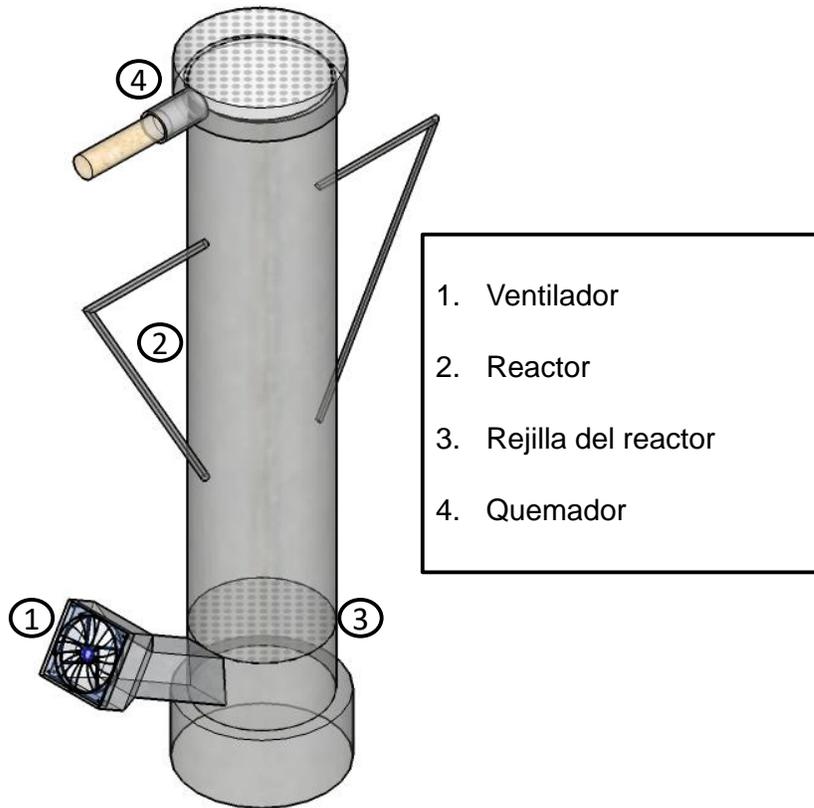
### 4.2 Propuesta de Diseño

La elección del diseño del sistema desalinizador se basó principalmente en la aplicación de los procesos correspondientes a gasificación y desalinización mediante una fase térmica. De esta manera y en respuesta a la búsqueda de componentes esenciales caracterizados por la versatilidad de operación de trabajo, se estableció un gasificador *updraft* y un mecanismo desalinizador constituido por un evaporador y un condensador. Además es importante mencionar que las escalas indicadas en cada una de las figuras de esta sección son proporcionales a las dimensiones señaladas en la sección de construcción.

Tomando en cuenta el primer componente concerniente al gasificador, se optó por un modelo que figure facilidades en el diseño y funcionamiento considerando una eficiente replicabilidad del mismo. De este modo se seleccionó el de tipo *updraft*, en donde la biomasa ingresa por la parte superior y el agente gasificante, en este caso aire, es inyectado por la parte inferior del equipo. De esta manera se produce el gas de síntesis o *syngas*, el cual fluye hacia arriba y se evacúa por la parte superior del reactor. Este tipo de gasificadores son comúnmente usados en sistemas de pequeña escala y cuentan con atributos como el de poseer largos tiempos de residencia y baja velocidad del gas (García, 2011a). Adicional a esto Heraz (2012), comenta acerca de la capacidad que tienen para provocar altas conversiones de combustible en gases, lo que evidencia una gran eficiencia calórica y por ende un buen aprovechamiento del carbono presente en la biomasa.

Con base en lo establecido por la FAO en el 2014, dentro del gasificador se produce el *syngas*, el cual puede ser usado para la generación de calor y energía que será conducida hacia el segundo componente esencial del sistema. Las reacciones que ocurren en el reactor del gasificador se distribuyen en cuatro zonas: zona de secado, zona de pirólisis, zona de gasificación y zona de combustión (Anexo 2). En la zona de secado se da la eliminación de la humedad de la biomasa que consecuentemente pasa hasta la zona de pirólisis para efectuar su descomposición térmica y producir reacciones endotérmicas de oxidación parcial en la zona de gasificación. Por último concluye en la zona de combustión con reacciones exotérmicas de oxidación total que conservan el calor en las zonas superiores. La presencia de estas reacciones sucede debido a la exposición a altas temperaturas, las cuales oscilan entre 500 °C y 1300 °C (Heraz, 2012). Teniendo en consideración lo anterior, se contempló la necesidad de utilizar un material que tolere condiciones extremas de calor y que al mismo tiempo tenga un espesor adecuado para la conservación de las temperaturas dadas por las reacciones (García, 2011a).

De acuerdo a la descripción previa que constata la utilidad de este primer componente, se definió el diseño con el cual se daría paso al proceso de gasificación. El gasificador *updraft* planteado se constituyó de cuatro partes que determinan su funcionamiento: ventilador, reactor, rejilla del reactor y quemador (Figura 2).

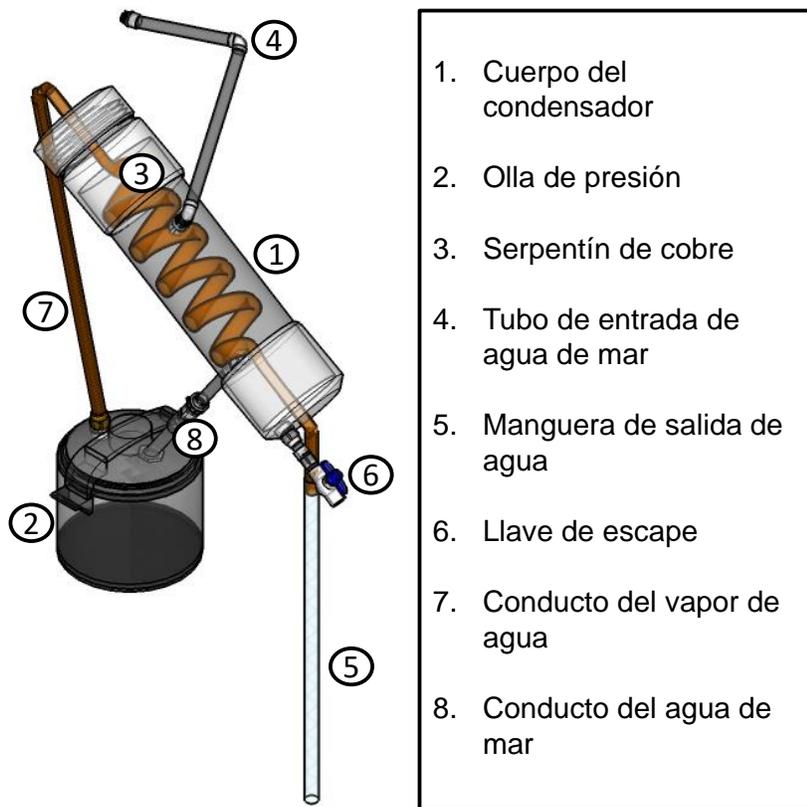


**Figura 2.** Diseño tridimensional del gasificador de flujo ascendente (escala 1:10).

El proceso de gasificación según el diseño ilustrado, acontece a partir del ventilador que proporciona el agente gasificante que será conducido uniformemente a través de la rejilla del reactor. Adicionalmente esta rejilla cumple con la función de separar las cenizas producidas durante la gasificación efectuada en el reactor, en donde una vez producido el *syngas* se establecerá una llama, la misma que se distribuirá homogéneamente por el quemador durante el tiempo de residencia de la gasificación.

Continuando con el segundo componente esencial del sistema, se ideó un mecanismo desalinizador que actúe separando sales minerales y otras sustancias diluidas en el agua proveniente del mar, a través de la evaporación. Para que este proceso ocurra, el líquido debe recibir una transferencia de energía expresada en calor, obteniendo como consecuencia el vapor de agua segregado de las sales minerales y demás componentes contaminantes. Seguidamente este vapor es condensado a través de tubos que constan con temperaturas inferiores a las del vapor de agua originado en el evaporador (Silva de Paz y Silva, 2015).

Con base en lo anterior, se determinó el diseño del mecanismo desalinizador conformado por un evaporador y un condensador (Figura 3). Ambas partes de este mecanismo se encuentran vinculadas mediante conductos que corresponden a materiales apropiados para conducir temperaturas considerablemente altas, así como el cobre y el hierro galvanizado (HG).

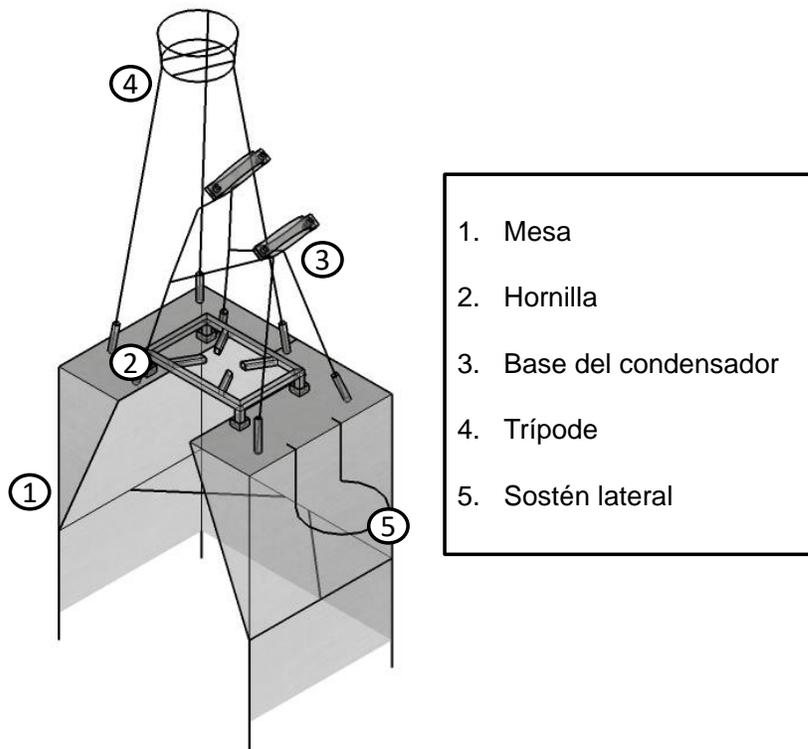


**Figura 3.** Diseño tridimensional del mecanismo desalinizador (escala 1:12,5).

El recipiente evaporador se concretó de acuerdo a la necesidad de someter una cantidad de agua de mar estimada a su punto de evaporación, mediante la transferencia de calor emitida por el gasificador. Es por ello que con el fin de reducir las pérdidas de vapor durante el proceso, se adquirió una olla de presión de acero inoxidable, la misma que debido a su funcionamiento y material permite conservar el vapor y reducir el daño corrosivo del agua de mar. A razón de conceder la entrada del agua de mar y salida del vapor de agua en la olla, se acoplaron dos conductos en la tapa de la misma, convirtiéndola así en la primera parte del mecanismo desalinizador (Figura 3).

Esta primera parte se desarrolla una vez que el agua de mar empieza a evaporarse, saliendo del evaporador hacia el condensador por medio del conducto conformado por un tubo de cobre que dentro del cuerpo del condensador tomará la forma de un serpentín. Este serpentín estará sumergido en agua fresca que ingresará previamente por un tubo de entrada, permitiendo de esta forma bajar el calor latente del vapor, para que posteriormente se condense y se convierta en el líquido que emerge a través de una manguera de salida.

Con el propósito de que el mecanismo desalinizador se ubique encima del gasificador para obtener de manera directa el calor otorgado por el mismo y en función de lograr un menor uso de área superficial, se precisó de una estructura de soporte que brinde apoyo y estabilidad a todo el sistema en general. Esta estructura se encuentra conformada principalmente por una mesa sobre la que se sitúan las demás partes correspondientes a una hornilla, una base del condensador, un trípode y un sostén lateral (Figura 4).



**Figura 4.** Diseño tridimensional de la estructura de soporte (escala 1:27,8).

Todas las partes de la estructura de soporte cumplen una función en específico, así como la de la hornilla, cuya función será servir de reposo para el recipiente evaporador. La base del condensador tiene como particularidad una inclinación de 30° que se estableció con la intención de que tanto el líquido que recorrerá el serpentín de cobre como el agua fresca que ingresará al cuerpo del condensador, puedan salir de este por efectos de gravedad. Por su parte, en el trípode se sitúa un recipiente que dispensará agua fresca al condensador y en el sostén lateral otro recipiente que contendrá el agua resultante de todo el sistema.

Los diseños tridimensionales ilustrados en las Figuras 2, 3, y 4 fueron generados en un programa de diseño gráfico denominado *SketchUp* (2016).

### 4.3 Construcción

Una vez definido el diseño que representa el sistema desalinizador, se continuó con la elaboración e implementación del mismo. De esta manera, la construcción efectuada se describe de modo detallado en esta sección.

#### 4.3.1 Gasificador *updraft*

Los materiales utilizados para el componente presentado en la Figura 2 fueron: tanque de oxígeno, lámina de hierro dulce, tubo HG cuadrado, tubo HG, madera y ventilador de computadora.

Por motivo de costos se optó por un tanque de oxígeno que luego se modificó y se adecuó al diseño establecido para el gasificador. Las dimensiones del tanque fueron de 1 m de alto x

0,21 m de diámetro interno y 0,23 m de diámetro externo. La altura se definió siguiendo la recomendación de Orosco (2016), la misma que se manifiesta en que “para un gasificador de pequeña escala se debe considerar que en el reactor por cada 0,03 m de altura tiene que tener al menos 0,01 m de diámetro”.<sup>1</sup> De este modo y a manera real, dicho tanque tiene una base de 0,10 m de alto y por encima de la base a 0,10 m se insertó la rejilla del reactor, cuyo material correspondió a una lámina de hierro dulce. Ahora en lo que concierne a la altura del reactor, con la recomendación citada se estimó una medida de 0,65 m. Sin embargo, se tuvo que considerar proporcionar un espacio libre de 0,15 m sobre la zona de secado con la finalidad de que la producción del *syngas* no se vea afectada por la alta cantidad de oxígeno presente fuera del gasificador.

Por debajo de la rejilla del reactor, se realizó un corte de 0,10 m x 0,05 m con el propósito de insertar un tubo HG cuadrado de 0,18 m de largo. Acoplado al anterior, se colocó otro tubo similar pero con 0,10 m por cada lado. La unión de estos formó un conducto sobre el que se posiciona el ventilador durante el proceso de gasificación para brindar la entrada de aire necesaria. Cabe recalcar que este instrumento correspondió a un ventilador de computadora que fue reutilizado al igual que el tanque de oxígeno, con la finalidad de disminuir costos en el proyecto.

Para el quemador se cortó otra lámina de hierro dulce y se perforó con un diámetro mayor a los hoyos de la rejilla del reactor. Después se lijó un aro del material sobrante del tanque de oxígeno para ensamblarlo con la lámina perforada anteriormente. Con la finalidad de agregarle una manivela se cortó 0,20 m de madera pilón y se adjuntó con un tubo HG de 0,10 m de largo x 1” de diámetro, obteniendo así el quemador definido en el diseño.

#### **4.3.2 Mecanismo desalinizador**

Para la obtención del evaporador (Figura 3) se empleó una olla de presión de acero inoxidable con capacidad de 8 L, en donde uno de los conductos insertados en la tapa de la misma correspondió a la asociación de dos tubos HG y PVC de ½”. Los ensambles utilizados para lograr las conexiones de este conducto fueron codo y válvula de paso HG, además de una unión de tope PVC. El otro conducto se compuso por un tubo de cobre de 3/8” ajustado mediante un adaptador y una unión sencilla del mismo material.

Con la intención de proporcionarle una superficie de contacto mayor al serpentín de cobre, se utilizó un tubo sanitario de policloruro de vinilo (PVC) de 6” y 0,50 m de largo como parte del cuerpo del condensador. Para complementar este componente, fue necesario colocar en un corte del tubo una tapa rosca PVC de 6” y en el otro una tapa lisa de igual material y dimensión. En el caso de la tapa lisa, se hizo un agujero donde se introdujo dos adaptadores macho y hembra PVC de ½”. Agregado a esto, se incorporó una porción de tubo PVC de ½” de 0,07 m

---

<sup>1</sup>Orosco Martínez, JE. *Descripción de prototipos de gasificadores updraft en Colombia* [llamada telefónica]. Llamada realizada por: Jhoselyn Mendoza y Kalem García. 10 marzo 2016. Comunicación personal.

de longitud en conjunto con una llave de bola PVC de ½", formando así la llave de escape del agua fresca que ingresa previamente al condensador.

Asimismo en la entrada y salida del condensador se realizó una incisión circular para pasar el tubo de cobre, que como ya se mencionó anteriormente, tomó forma de serpentín dentro del cuerpo del condensador. Este tubo constó con una longitud total de 7 m, de la cual aproximadamente 6 m corresponden al serpentín que se moldeó con un diámetro de 0,10 m para cada espiral.

Para crear el tubo de entrada de agua se utilizaron materiales de PVC con ½" de diámetro, de esta manera se instalaron dos adaptadores macho y hembra en la parte superior del cuerpo del condensador. Consecutivamente se conectaron dos tubos con dos codos de 90° y con ayuda de adaptadores macho y hembra nuevamente, se introdujo esta conexión en el recipiente de agua entrante situado sobre el trípode.

Es importante hacer énfasis en que a razón de seguir con el principio de fácil montaje y desmontaje de cada componente del sistema, se usaron estratégicamente materiales de acople como la unión de tope y los adaptadores macho y hembra.

#### **4.3.3 Estructura de soporte**

Para esta armazón mejor representada en la Figura 4, se emplearon los siguientes materiales: varillas de construcción corrugada, lámina HG, lámina de hierro dulce y tubo HG cuadrado.

La mesa se dimensionó en función del mecanismo desalinizador y el gasificador, definiendo así una altura de 1 m x 0,80 m de ancho y 0,60 m de largo. La infraestructura de esta mesa se constituyó con varillas de construcción de 3/8", la parte externa se forró con una lámina HG y la parte superior se cubrió con una lámina de hierro dulce. En el borde delantero central de la misma, se realizó una hendidura rectangular de 0,30 m de ancho x 0,50 m de largo para permitir el acceso del gasificador al sistema. Al lado izquierdo se colocó un sostén lateral elaborado a partir del mismo material de la infraestructura, en el cual se posiciona el recipiente receptor de agua saliente.

Para efectos de apoyo del condensador y el recipiente contenedor del agua entrante al sistema, se confeccionó un trípode de 1 m de altura para el recipiente y una base para el condensador con una altura mínima de 0,62 m, ambas estructuras con el mismo material de la infraestructura. En lo que respecta a la hornilla, se optó por una base rectangular de 0,25 m de ancho x 0,40 m de largo y 0,07 m de alto elaborada con un tubo HG cuadrado de ½". Los recipientes contenedores del agua entrante y saliente del sistema fueron envases plásticos reutilizados con la finalidad de abaratar costos.

### **4.4 Materia Prima**

#### **4.4.1 Fibra de coco**

Tomando en cuenta la composición de la fibra de coco (Cuadro 1), se tiene como primer punto a favor que al constar con lignina puede poseer un alto contenido energético que pone en

evidencia a esta biomasa como una fuente de poder calórico suficiente para ser usada como combustible.

**Cuadro 1.** Composición estructural de la fibra de coco y rango de temperatura a la que se desvolatilizan. †

Componentes	Contenido (%)	Temperatura de descomposición (°C)
Hemicelulosa	28,4	250 – 350
Lignina	19,4	250 – 550
Celulosa	52,2	300 – 430

† Datos expuestos por Montoya *et al.* (2013).

En lo referente al proceso de gasificación, la fibra de coco está constituida en términos generales por un 8,6 % de humedad, 1,4 % de cenizas, 79,2 % de material volátil y 19,4 % de carbono fijo (García *et al.*, 2010). Donde el material volátil contenido en la misma representa un factor determinante en lo referente al tiempo de gasificación, esto a causa de que la eliminación de este componente se encuentra relacionada con la variación de temperatura dada en todo el proceso (Cuadro 1).

Además considerando que el uso de biomasa en procesos de combustión disminuye significativamente el impacto ambiental generado por la producción de SO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S, donde los valores de S se encuentran por debajo del 1 % para la biomasa en general. Se reafirma el empleo de la fibra de coco debido a que contiene un 0,24 % de S, lo cual la hace una materia prima idónea para la reducción de daños que causan este impacto (Montoya *et al.*, 2013).

Retomando lo indicado por Tooy *et al.* (2014), la biodegradación de la fibra de coco transcurre en un lapso de aproximadamente 10 años, lo que conlleva a una serie de consecuencias tanto positivas como negativas. En relación con lo positivo, se destaca el acceso y disponibilidad de esta biomasa durante un periodo de tiempo considerablemente amplio. Por otro lado, la lenta descomposición de esta materia supone un problema ambiental que conlleva a la disminución de la vida útil de vertederos sanitarios y basurales (Cortez *et al.*, 2009). Es así que con el fin de contribuir de cierto modo con la remediación de este problema, se tomó en cuenta lo citado en este párrafo como otro punto a favor para la fibra de coco como biomasa.

Ahora en contexto con este proyecto y en base a lo expuesto anteriormente, se procedió con la selección de la fibra de coco como materia prima para la obtención de energía. El motivo principal radicó entorno a la disponibilidad en zonas costeras, sector hacia donde está destinado el sistema desalinizador.

La fibra de coco utilizada en dicho sistema provino de la región Huetar Caribe en tres presentaciones diferentes: natural, medio y chips (Figura 5). El secado de la fibra tipo natural se efectuó de manera artesanal colocándola al sol por aproximadamente 3 h. Para el caso de las

de tipo chips y medio, al ser adquiridas en forma de bloques se disgregaron manualmente para posteriormente secarlas de igual manera por 4 h (ver Cuadro 2).



**Figura 5.** Tipos de fibra de coco.

Con la finalidad de analizar los distintos tipos de fibra en función de su eficiencia para gasificación, se registraron datos específicos de propiedades de interés iniciales (Cuadro 2). Por lo cual se consideró que para efectos de homogeneidad en las pruebas realizadas, todos los tipos ocupen un volumen de 0,02 m<sup>3</sup> en el reactor del gasificador. Esto a razón de someter a cada una a circunstancias equivalentes y de este modo determinar el peso correspondiente para dicho volumen. En lo referente a la humedad, se obtuvieron valores en porcentajes de masa seca al secar la materia prima en un horno a 550 °C por 24 h. La porosidad para tipo medio y chips vino establecida por defecto en el producto, mientras que el valor para la de tipo natural se tomó como referencia un proyecto realizado por Herrera (2011).

**Cuadro 2.** Condiciones de la fibra de coco utilizada en el proceso de gasificación.

Tipo	Tamaño de partícula (m)	Peso por prueba (kg)	Humedad (%)	Porosidad (%)
Natural	0,1 x 0,05	1,2	16	91
Medio	0,001 x 0,001	3,5	13	95
Chips	0,01 x 0,01	2	11	79

#### 4.4.2 Agua de mar

El agua de mar se adquirió en las orillas de Playa Bonita, ubicada en la provincia de Limón. Se trasladó de forma inmediata y en envases plásticos en condiciones ambientales hacia el lugar de experimentación, en donde en primera instancia se procedió a tomar una muestra para su respectiva caracterización.

El estado del agua de manera cualitativa se examinó considerando su color y olor. Consecuentemente, la composición química determinó los niveles de pH, Na, demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y demanda biológica de oxígeno (DQO) que contuvo la misma para el posterior estudio de análisis.

#### 4.5 Diseño Experimental

El diseño experimental aplicado correspondió a un análisis de experimento factorial con dos repeticiones. La evaluación de operación del sistema estuvo sujeta a la determinación de la fibra de coco para tres presentaciones diferentes y al modo único de aplicación del agua de mar, ambos como factores de las variables independientes (Cuadro 3).

**Cuadro 3.** Parámetros de evaluación con respecto a las variables independientes.

<b>Variables independientes</b>	<b>Factor</b>	<b>Niveles</b>
Fibra de coco	Tipo	Natural
		Medio
		Chips
Agua de mar	Modo de aplicación	Directa

Por otro lado, la evaluación de la eficiencia del sistema correspondió a la variable dependiente que por su parte se retribuye a la calidad del agua establecida mediante análisis químico (Cuadro 4).

**Cuadro 4.** Parámetros de evaluación con respecto a la variable dependiente.

<b>Variable dependiente</b>	<b>Factor</b>	<b>Niveles</b>
Agua entrante y saliente	Composición química	pH
		Na
		DBO
		DQO

Los tratamientos que contribuyeron con las pruebas efectuadas se aplicaron mediante la combinación de los factores de las variables independientes. De esta manera se obtuvo un total de tres tratamientos con dos repeticiones cada uno. Finalmente se establecieron seis pruebas para la evaluación de todo el sistema en general (Cuadro 5).

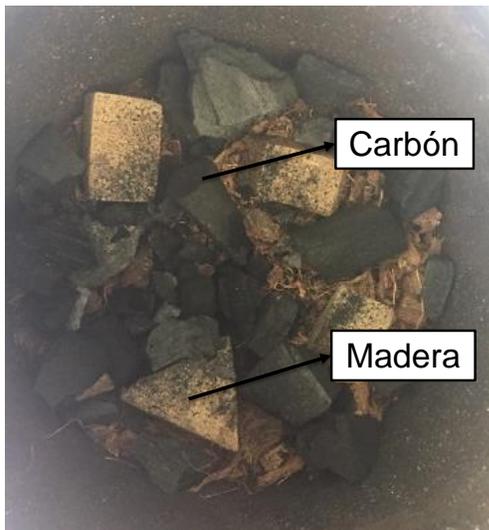
**Cuadro 5.** Tratamientos evaluados con respecto a los factores de las variables independientes.

<b>Tipo de fibra de coco</b>	<b>Modo de aplicación del agua de mar</b>	<b>Tratamientos</b>
Natural	Directa	T1
Medio	Directa	T2
Chips	Directa	T3

#### 4.6 Modalidad de Pruebas

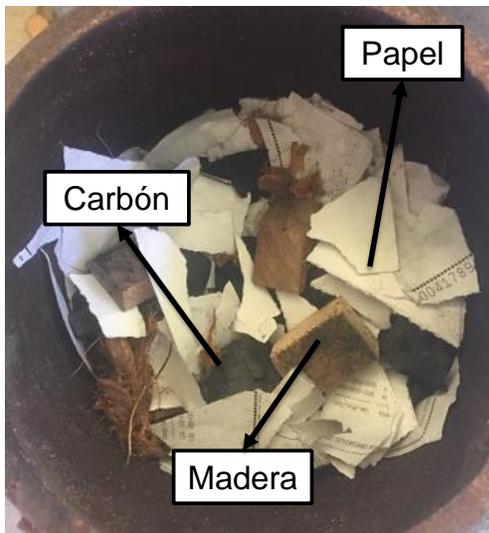
Para llevar a cabo el desarrollo de las pruebas definidas fue necesario estandarizar el proceso de alimentación de las materias primas y tiempos para la respectiva toma de datos. Todo inicia con la alimentación del gasificador, en donde se depositó parte de la fibra hasta los primeros

0,45 m del reactor para luego agregarle trozos de madera de aproximadamente 0,05 m x 0,03 m y carbón de parrilla (Figura 6).



**Figura 6.** Capa de madera y carbón a los primeros 0,45 m del reactor.

Se terminó de poner la fibra hasta los 0,65 m de altura del reactor y nuevamente se procedió a añadir trozos de madera en conjunto con carbón, retazos de papel reciclado y alcohol antiséptico (Figura 7). Este último se usó con el objetivo de encender con mayor rapidez la llama inicial, importante para que el proceso de gasificación ocurra.



**Figura 7.** Capa de madera, carbón y papel en la superficie de llenado de fibra.

Complementando lo anterior, el ventilador de 16 A que provisionó el aire de abajo hacia arriba constó con una velocidad de inyección modulada a  $\frac{1}{4}$  en el regulador (Figura 8). Lo cual representó una velocidad constante durante el proceso de gasificación en todas las pruebas efectuadas.



**Figura 8.** Regulador de velocidad del ventilador.

En relación a la alimentación del mecanismo desalinizador, se hace énfasis en que a pesar de tener el conducto del agua de mar acoplado al evaporador, no se pudo verificar cuánta agua se incorporó a través del condensador. Por lo que se optó por introducir esta materia prima de manera directa a la olla con el propósito de conocer la cantidad real de agua de mar que ingresó el sistema y en comparación con el volumen del agua saliente observado en la probeta, determinar la eficiencia del proceso. Es así que se estableció 1 L de agua de mar como volumen estándar para todos los tratamientos.

Por otro lado y a manera detallada, los datos compilados en campo correspondieron a la necesidad de generar información suficiente para una adecuada discusión de resultados (Cuadro 6). Los cuales se presentan de modo pertinente a cada parámetro considerado relevante para la fase de prueba de los tres tratamientos.

**Cuadro 6.** Resumen de la dinámica para obtención de datos en las pruebas realizadas.

Parámetro	Instrumento	Procedimiento
Agua entrante (L)	Beaker plástico de 2 L	Una vez que se inició la llama en el gasificador, se suministró 8 L de agua fresca al recipiente situado en el trípode para luego evacuar la misma por la llave de escape del condensador cada 20 min, al mismo tiempo se agregó agua fresca nuevamente
Agua saliente (mL)	Probeta de 1000 mL	Previo a la prueba se reemplazó el recipiente ubicado en el sostén lateral por la probeta, esto con la finalidad de tener una lectura de volumen más precisa
Temperatura en el quemador (°C)	Termómetro digital de láser	La primera medición se realizó a los 5 min después de que se inició la llama en el gasificador y luego cada 30 min hasta la final
Tiempo de gasificación (min)	Cronómetro digital	Se tomó en cuenta el momento desde que se estableció la llama hasta que se ausentó

#### 4.7 Análisis Químico

Con la intención de evaluar la calidad del agua antes y después de su paso por el sistema, se realizaron análisis químicos al agua de mar y al agua saliente de cada prueba acorde a cada tratamiento. Para esta evaluación se determinó como parámetros de interés el pH, DBO, DQO y Na; los cuales indicaron la condición de las muestras obtenidas. Sin embargo, con la finalidad de exponer ampliamente el estado de la materia prima utilizada en las pruebas, en el Cuadro 7 se muestra la composición química de la misma, incluyendo otros parámetros no considerados para la comparación con el agua saliente.

**Cuadro 7.** Análisis químico del agua de mar entrante al sistema.

pH	Conductividad eléctrica	DBO	DQO	NO <sub>3</sub>	Sólidos totales	Na	Turbidez
	dS/m	----- mg/L -----					NTU
8,42	53,5900	180	776	0,47	53 547	12 193	0,075

Según la descripción de la OMS (2006) el pH es un parámetro importante en la calidad del agua, el mismo que puede cambiar su valor óptimo de acuerdo a los sistemas de abastecimiento en base a la composición del agua y al tipo de materiales utilizados en el sistema de distribución. Además se indica que no existe un valor propuesto en función de los efectos sobre la salud humana.

El umbral gustativo promedio del Na se encuentra alrededor de 200 mg/L, esto considerando que la sustancia se encuentra a temperatura ambiente (Cuadro 8). La DBO y DQO son parámetros que permiten conocer la cantidad de materia orgánica contenida en el agua (León, 2009), razón por la cual se tomó en consideración como otro parámetro evaluado.

**Cuadro 8.** Parámetros para la determinación de la calidad de agua potable. †

pH	DBO	DQO	Na
	----- mg/L -----		
6,5 - 8,5	< 5	≥ 25 - ≤ 50	≤ 200

† Datos tomados de fuente de la OMS (2006) y Zhen (2009).

Por su parte, los procedimientos realizados para el análisis químico de todas las pruebas correspondieron a los mencionados en el Cuadro 9.

**Cuadro 9.** Métodos utilizados para la obtención de valores en el análisis químico.

Parámetros	Herramienta
DBO	Controlador OxiTop 71
DQO	Reactor exotérmico y equipo colorimétrico
pH	pH metro
Na	Análisis directo por espectrómetro de emisión óptica con plasma (OEM – ICP)

## 5 Resultados y Discusión

Hoy en día existen muchas plantas desalinizadoras alrededor del mundo, las cuales emplean la aplicación de energías renovables para este fin. Dentro del contexto de energías renovables este proyecto se caracteriza por su enfoque específico en la obtención de agua apta para consumo humano a partir de energía de biomasa.

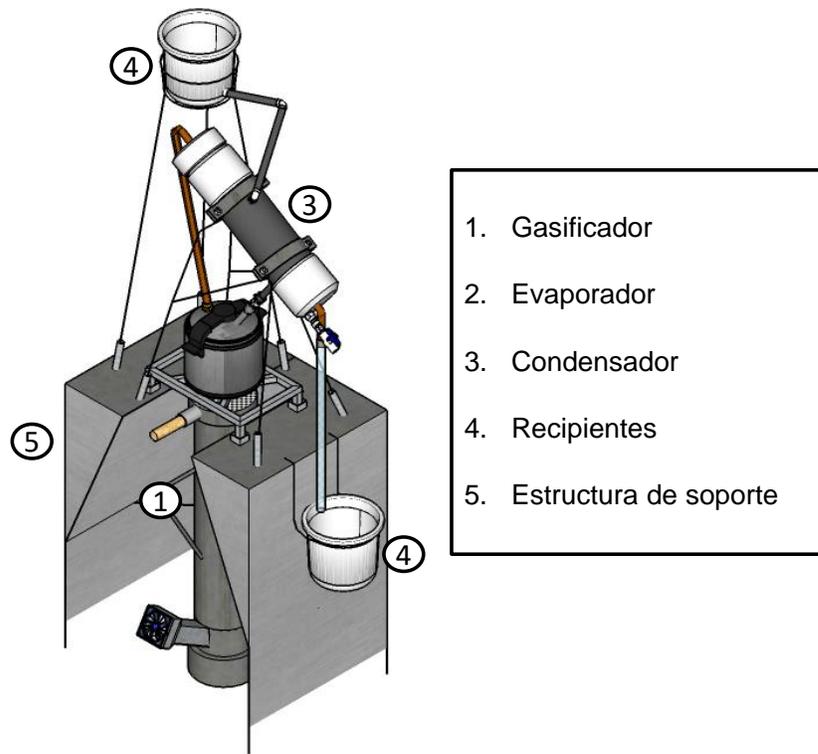
A continuación se mencionan los resultados del proceso de desalinización y evaluación del sistema; considerando el uso del programa estadístico *InfoStat* versión 2016, para el establecimiento de diferencias significativas (Di rienzo *et al.*, 2014).

De este modo, el conjunto de datos resultantes se evaluó con el análisis ANOVA, mediante el método de comparación de *Tukey*. En donde el intervalo de confianza (*p-value*) correspondió a 0,05 y estuvo dado por diferencia de medias. Cuando el *p-value* obtenido supera este valor, significa que existen diferencias significativas entre tratamientos (Fallas, 2012).

El método mencionado calificó cada tratamiento a partir de al menos dos repeticiones por muestra, razón por la cual los tratamientos T2 y T3 fueron analizados en todas las categorías a comparación del T1 que se evaluó únicamente en el tiempo de gasificación y cantidad de agua saliente.

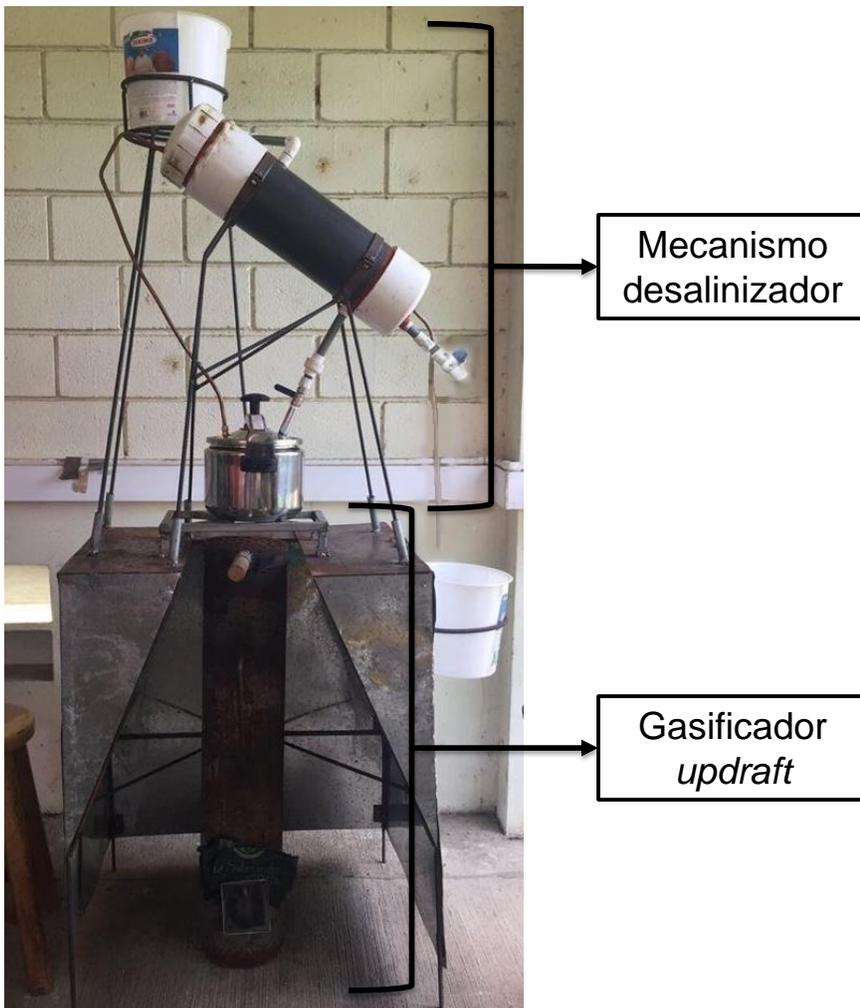
### 5.1 Diseño y Construcción

En conjunto con todo lo expuesto en la sección de metodología, se propuso el diseño complementario para el sistema desalinizador de agua. Este diseño contempló estructuras prácticas y desacoplables que permitan un sencillo montaje y desmontaje de cada uno de los componentes del sistema (Figura 9).



**Figura 9.** Diseño tridimensional del sistema desalinizador de agua (escala 1:28,6).

Posteriormente se desarrolló el proceso de construcción obteniendo como resultado lo que se puede apreciar en la Figura 10.



**Figura 10.** Imagen del sistema desalinizador con sus componentes.

Con relación a lo planteado inicialmente en el proyecto, el prototipo construido cumple con los principios establecidos acorde a la facilidad de acoplamiento de cada una de las partes que lo componen.

En adición a esto, el área superficial que ocupa en un espacio determinado corresponde a  $0,48 \text{ m}^2$  y la altura en general es de 2 m. Lo anterior pone en evidencia que el sistema manufacturado es de pequeña escala y altamente replicable en cualquier zona costera. El costo total de construcción del sistema fue de aproximadamente \$ 420 dólares americanos, los cuales se desglosan por componente en la sección de anexos (Anexo 1).

## 5.2 Tipo de Fibra de Coco

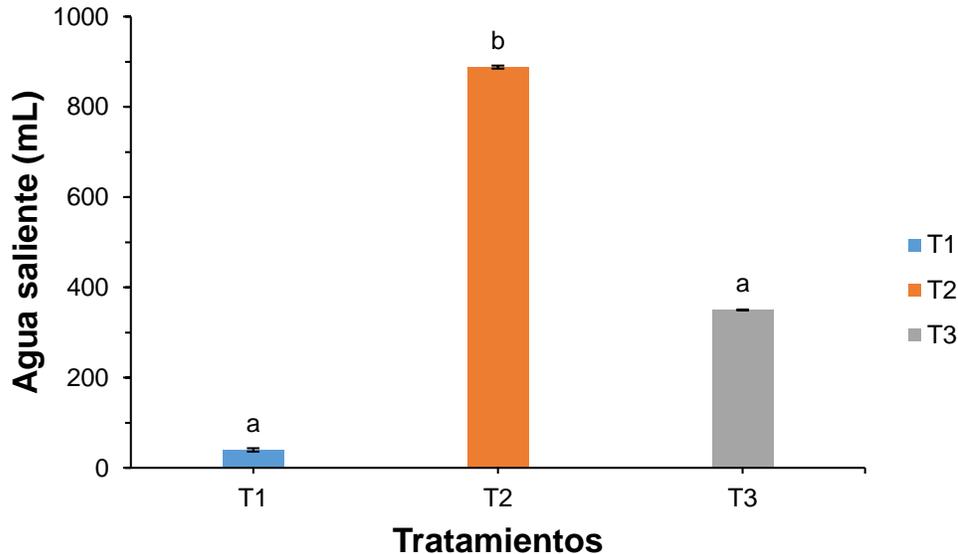
Los resultados que se muestran a continuación explican con cuál tratamiento se obtuvo la mayor cantidad de agua por el proceso de desalinización con respecto al tiempo de gasificación proporcionado por el tipo de fibra.

De acuerdo al análisis estadístico, se obtuvieron los resultados expresados en la Figura 11, la cual muestra la diferencia significativa de los promedios de la cantidad de agua saliente que

existe entre los tratamientos. El tratamiento que obtuvo mayor cantidad de agua correspondió al T2 con el tipo de fibra caracterizada como medio, la cual según la Figura 11 evidencia la diferencia significativa con respecto a los demás tratamientos. El T1 obtuvo 40 mL, una cantidad menor comparado con los otros tratamientos T2 con 888,3 mL y T3 con 370 mL (Anexo 3).

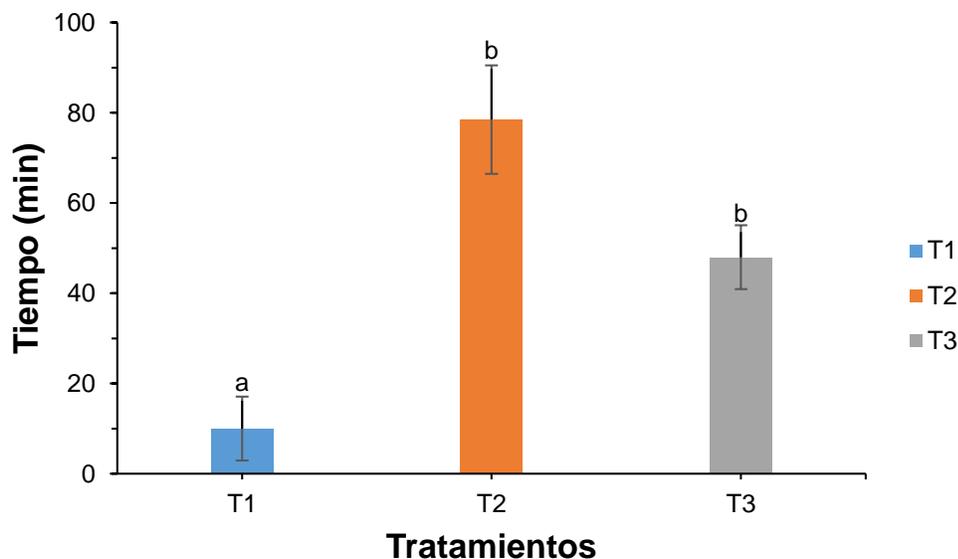
El T1 y T2 no mostraron diferencias significativas, pese a que en la práctica la cantidad de agua obtenida en el T3, correspondiente a fibra de coco tipo chips fue en promedio hasta ocho veces mayor al agua obtenida en el T1 con fibra de coco tipo natural.

En sistemas convencionales de desalinización por evaporación, como los estudiados anteriormente, el porcentaje de recuperación de agua varía según el proceso siendo así el más bajo entre un 12 % y 20 % para tipos MSF, 30 % y 40 % para MED y obteniéndose los valores mayores entre 40 % y 50 % en el CV (Ramilo *et al.*, 2003). El sistema desalinizador evaluado en este estudio obtuvo una eficiencia de recuperación de agua en el T1 de 4 %, en el T2 de 88,8 % y el T3 de 37 %.



**Figura 11.** Producción de agua saliente del sistema por cada tratamiento (barras con la misma letra no difieren estadísticamente,  $p \leq 0,05$ ).

La cantidad de agua saliente difiere del tiempo de gasificación de cada tratamiento, de manera que se obtuvo resultados estadísticos variantes entre sí. De este modo en la Figura 12 se muestra como según el análisis no existen diferencias significativas en los tiempos de gasificación entre los tratamientos T2 y T3 y sí en el T1 en donde el tiempo de gasificación correspondió a tan solo 10 min. No obstante, el T2 obtuvo un tiempo de residencia de 78,5 min y el T3 48 min.



**Figura 12.** Duración del proceso de gasificación de la fibra de coco por cada tratamiento (barras con la misma letra no difieren estadísticamente,  $p \leq 0,05$ ).

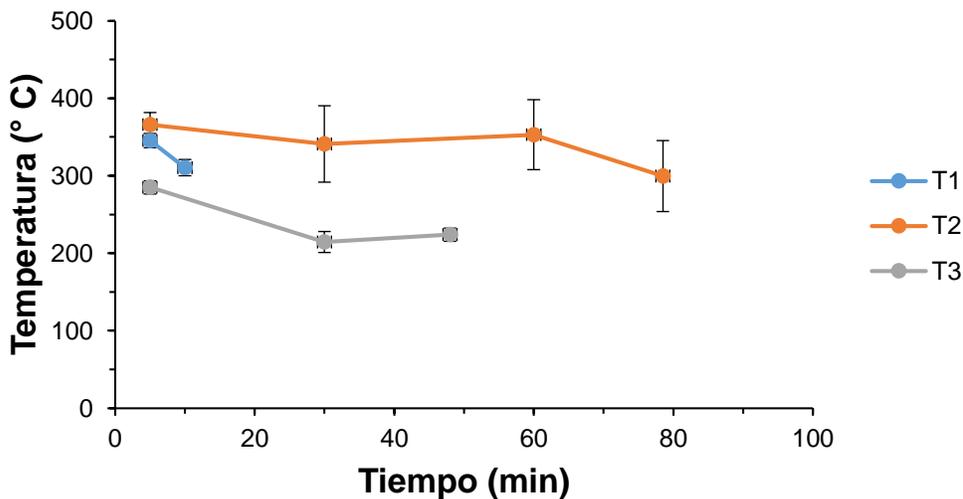
Es importante acotar que existen factores que inciden en el proceso de gasificación, los cuales se deben a las características del tipo de biomasa. Uno de estos factores corresponde al tamaño de partícula. Los tamaños de partícula en el experimento variaron según el tratamiento (Cuadro 2). Las recomendaciones que se indican según la literatura dependiendo del tipo de gasificador en este caso *updraft*, el tamaño de partícula va de 0,01 m a 0,10 m (Arteaga *et al.*, 2014). El tamaño de partícula pequeño incrementa la calidad del *syngas* y disminuye el tamaño del reactor, sin embargo cuando las partículas son muy pequeñas puede suceder que la biomasa obstruya los conductos o que sea transportada junto con las cenizas en suspensión hacia al exterior del equipo de manera prematura (IDAE, 2007b). Por otro lado, partículas muy grandes provocan problemas de arranque, mala calidad del gas y canalización del mismo, situación que ocurre principalmente en gasificadores de flujo ascendente (FAO, 1986).

Acorde a esto se observa cómo según el tamaño de partícula de los diferentes tipos de fibras, el proceso de gasificación funcionó en el T2 y T3, a comparación del T1 en donde durante la práctica se mostró una mala distribución del gas, problemas con el encendido y un tiempo de gasificación considerablemente bajo.

Otro factor relevante en el proceso de gasificación corresponde al contenido de humedad. Según IDAE (2007b), se recomienda que la biomasa tenga entre el 10 % y 15 % de humedad ya que según Heraz (2012), los gases combustibles o de síntesis poseerán un poder calorífico superior importante. Con base en lo anterior, el contenido de humedad de las muestras se encontraba dentro de este rango, a excepción de la fibra natural la cual estaba con un 1 % superior al rango límite (Cuadro 2). Esta situación puede haber sido otra razón por lo cual existió cierta diferencia entre los tratamientos durante el tiempo de gasificación.

El contenido de humedad de la biomasa es determinante en el proceso de gasificación debido a que cada kg de humedad necesita como mínimo 2260 kJ de energía para evaporizarlo, lo que implicaría en el caso de un porcentaje de humedad alto una pérdida representativa de energía. Debido a esto se vuelve básico eliminar un gran porcentaje de humedad de modo que se pueda aprovechar directamente la energía producida en la gasificación y no en circunstancias paralelas (Castellano, 2014).

Cuando la humedad de la fibra es alta o baja, la temperatura juega un papel significativo, puesto que tenderá a bajar si el nivel de humedad es alto y será mayor si el nivel de humedad en la muestra es bajo (Tooy *et al.*, 2014).



**Figura 13.** Temperatura en el quemador durante el proceso de gasificación de cada tratamiento.

A manera de análisis de lo representado en la Figura 13, se nota una tendencia que para el caso del T1 y T2 se obtuvieron valores de temperatura que superan los 300 °C (345 °C y 366 °C, respectivamente), lo que en comparación con el T3, a lo largo de su proceso de gasificación se mantuvo en un rango de 220 °C a 285°C (Anexo 6). Esto se atribuye al porcentaje de porosidad en las partículas de la fibra de coco, las mismas que según el Cuadro 2 en la sección de metodología, corresponden a 91 % para el T1, 95 % para el T2 y 79 % para el T3.

Lo anterior se respalda en la investigación realizada por García (2011b), en donde se afirma que a medida que sucede el proceso de gasificación, este porcentaje de porosidad incrementa paralelamente con la reducción en peso de masa y el diámetro de las partículas. Además de que ese incremento resulta proporcional a la velocidad con la que ocurren las reacciones de gasificación. Es decir que cuando se tiene mayor porosidad, como efecto de dichas reacciones se da la elevación de temperatura en el proceso y se convalida la razón por la cual los datos de temperatura obtenidos se grafican de esa forma.

### 5.3 Calidad del Agua

Devora *et al.*, (2013), menciona que “la disponibilidad de agua no implica que su calidad permita su uso”, por lo cual es necesario que el agua destinada para consumo humano pase por un sistema de tratamiento.

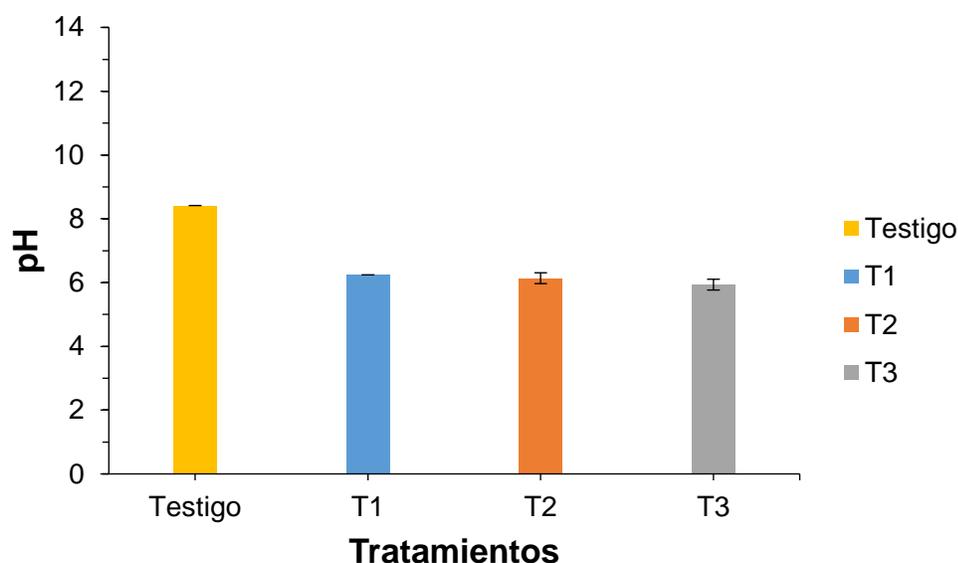
**Cuadro 10.** Análisis químico del agua entrante y saliente con respecto a los parámetros considerados para evaluación. †, ‡

Muestras	pH	DBO	DQO	Na
		----- mg/L -----		
Testigo	8,42	180	776	12193
T1	6,24	80	136	-
T2	6,14	60	106,5	113,45
T3	5,94	180	340	16,02

† Los valores expresados para la muestra T2 y T3 corresponden a promedios obtenidos a partir de dos repeticiones, en el caso del T1 le conciernen a una sola repetición.

‡ El parámetro Na en el T1 no se evaluó por cantidad insuficiente de la muestra.

Retomando los parámetros establecidos por la OMS en el 2006 (Cuadro 8) en cuanto a potabilidad del agua, el pH de los resultados obtenidos en cada una de las muestras está por debajo de lo aceptable. El parámetro más cercano a la caracterización de calidad fue el T1 con 6,24, sin embargo no se confirma que este valor sea el más apto debido a que corresponde a una sola repetición, a diferencia de los demás tratamientos (Figura 14). El T2 y T3 variaron los valores en cuanto a este parámetro de manera que para ambos tratamientos el pH fue de 6,14 y 5,94 respectivamente. El pH bajó considerablemente a partir de la muestra tomada en el agua de mar entrante, la misma que corresponde al testigo (Cuadro 10).

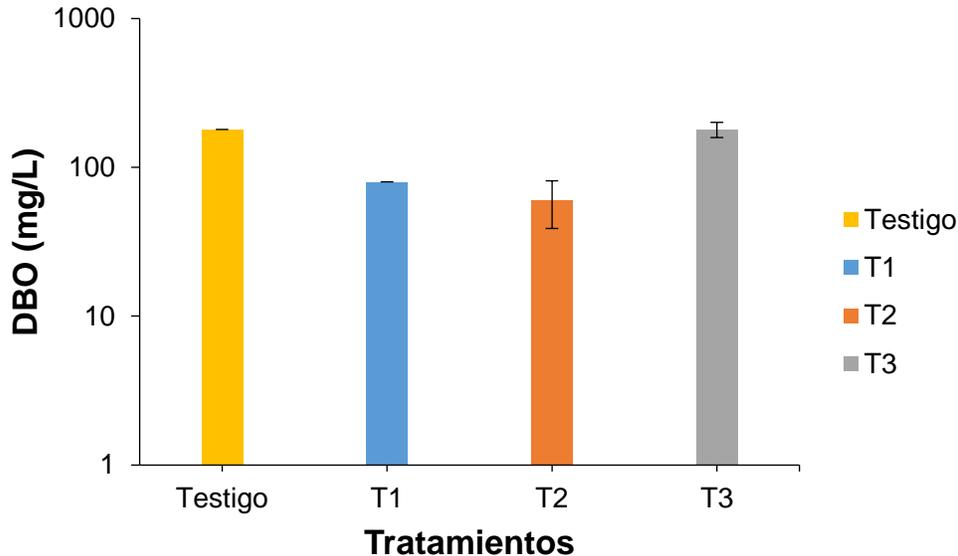


**Figura 14.** pH de las muestras de agua saliente de cada tratamiento en comparación con el testigo.

A comparación de pH obtenidos en procesos de desalinización convencionales, los valores expresados en el Cuadro 5 son incluso mayores que en dichos procesos. Según Valero *et al.*, (2001) en procesos de ósmosis inversa se logran valores en pH de 5,5, mientras que el máximo alcanzado en las pruebas fue de 6,14. En lo que compete a procesos térmicos como el de evaporación, la fuente mencionada supera el valor máximo en pruebas con un 7,2 de pH.

Haciendo esta comparación con la desalinización a gran escala, las tecnologías aplicadas en estos procesos, someten el agua de mar a pre y post tratamientos físicos-químicos los cuales modifican las características del agua. Esto busca asegurar que la calidad del agua logre la potabilización y distribución como agua de consumo humano al finalizar el proceso (Ministerio de Sanidad, Servicios Sociales e Igualdad del Gobierno de España, 2009).

Los resultados obtenidos para los parámetros de DBO y DQO indican la calidad de este recurso y su grado de permisibilidad ante el reglamento costarricense, los cuales han sido mostrados en el Cuadro 8. A partir de la muestra de agua de mar, se obtuvieron valores para DBO y DQO de 180 mg/L y 776 mg/L respectivamente (Cuadro 7).

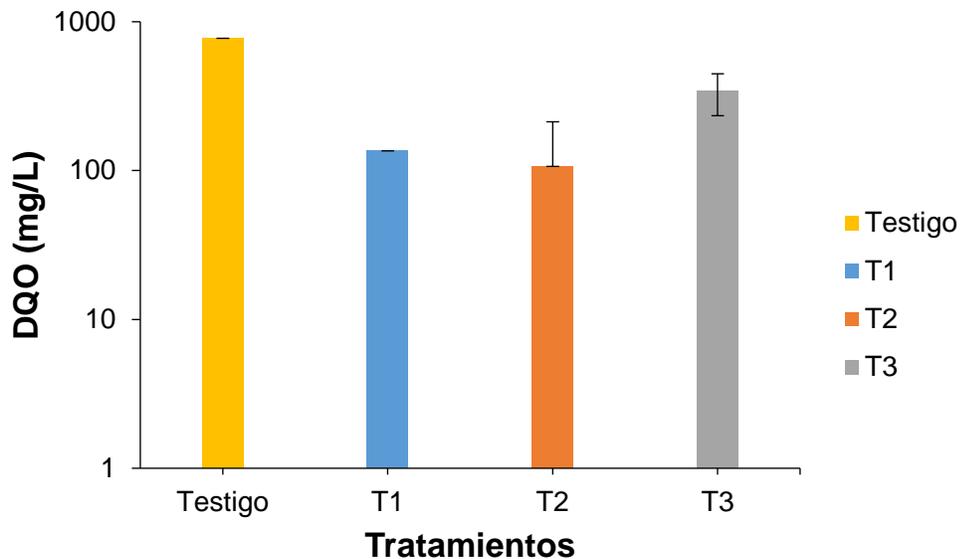


**Figura 15.** DBO en las muestras de agua saliente de cada tratamiento en comparación con el testigo.

Los valores obtenidos para el DBO en los tres tratamientos van de 90 mg/L a 180 mg/L, categoría que comparada a lo aceptable demuestra claramente cierta contaminación en la muestra de agua de mar tomada para la evaluación (Figura 15). Según Zhen (2009), el rango establecido correspondiente a 100 mg/L - 400 mg/L caracteriza a una muestra como aguas residuales urbanas. Comparando el DBO del testigo de 180 mg/L con los tratamientos, el T3 no bajó en ambas repeticiones a diferencia del T2 el cual de 180 mg/L disminuyó a 90 mg/L.

Por su parte, los valores de DQO en los tres tratamientos fueron de 136 mg/L para el T1, 106,5 mg/L para el T2 y 340 mg/L para el T3. Nuevamente con referencia en Zhen (2009) respecto a la clasificación del uso potencial del agua, los valores establecidos se ubican en

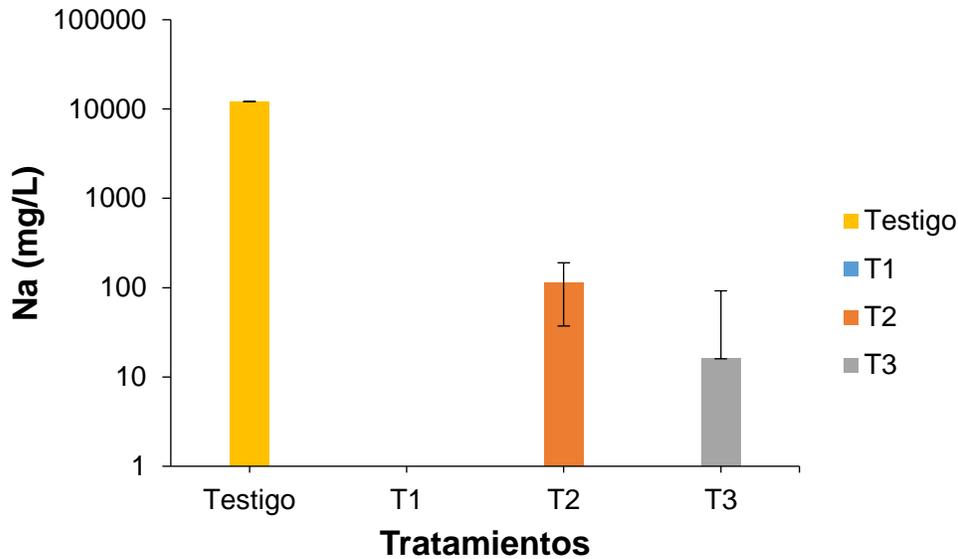
cinco clases en donde la mayor comprende un rango de 100 mg/L a 300 mg/L y se denomina como clase 5. Esta clase alude al agua que no puede ser utilizada para el uso y consumo humano. Por lo que tomando en cuenta los valores de DQO obtenidos (Figura 16), todos los tratamientos se sitúan en esta clasificación.



**Figura 16.** DQO en las muestras de agua saliente de cada tratamiento en comparación con el testigo.

Tal como se explica en la metodología, el agua fue tomada a orillas de una zona con alta actividad antropogénica lo cual expone la idea del motivo de contaminación. Según el Ministerio de Sanidad, Servicios Sociales e Igualdad del Gobierno de España (2009) generalmente en zonas de la franja del litoral, existe gran contaminación con una alta riqueza biológica. Situación que se da a causa del arrastre de material contaminante a través de aportes fluviales y emisarios submarinos. Entre los principales contaminantes se encuentra la materia orgánica, metales pesados, hidrocarburos y otros contaminantes. La contaminación dada por aguas residuales urbanas y ganaderas, aportan materia orgánica rica en nutrientes como C, N y P. Además de la existencia de detergentes y microorganismos, los cuales tienden a estar presentes en el agua que es captada para procesos desalinizadores. El efecto de este tipo de aguas supone además la contribución de sales minerales nutritivas, dando lugar a un exceso de N y P, lo cual provoca una eutrofización. A parte de incrementar las poblaciones de fitoplancton en mayor magnitud al zooplancton, provoca el aumento del detritus orgánico sedimentado sobre el fondo. Su descomposición consume mayor parte del oxígeno disuelto en el agua, produciendo fenómenos de reducción química y graves limitaciones en las formas vivas. Bajo estas circunstancias se puede relacionar que los valores obtenidos en el experimento han sido posiblemente determinados a la existencia de una alta cantidad de materia orgánica, como producto de la contaminación.

Otro de los parámetros a considerar debido a la importancia del mismo en calidad del agua, es el contenido de Na. Los valores obtenidos para los tratamientos T2 y T3, presentan cantidades similares de Na con lo que de acuerdo a lo establecido por la OMS (2006) están dentro del rango permitido para consumo humano ( $\leq 200$  mg/L).



**Figura 17.** Contenido de Na en las muestras de agua saliente de cada tratamiento en comparación con el testigo.

El contenido de Na con respecto al agua entrante al sistema, disminuyó drásticamente en los tratamientos, pasando de 12 193 mg/L a 113,45 mg/L en el T2 y a 16,02 mg/L en el T3, ambas cantidades obtenidas en el agua saliente (Figura 17).

En trasfondo con lo obtenido se hace alusión a la diferencia que existe entre el tratamiento T2 y T3 en cuanto al contenido de Na. Esta situación puede estar relacionada al tiempo de gasificación y la temperatura suministrada en estos tratamientos.

Como se muestra en la Figura 13, la temperatura mayor registrada se dio en el T2, donde ascendió a los 299,5 °C en la última etapa del proceso de gasificación. Cuando terminó todo el proceso desalinizador en la mejor repetición, se obtuvieron 976,6 mL de agua saliente de 1 L, obteniendo así 35,4 g de salmuera (Anexo 5). Esta cantidad de agua se obtuvo en la primera repetición en donde además presentó una temperatura de 385 °C la cual fue la mayor de todas (Anexo 6).

La composición química del agua de mar está dada por varias sales, sin embargo el cloruro y el Na son los minerales que conforman el 80 % de las sales en solución, en donde el 40 % es Na y 60 % es cloruro (Cifuentes *et al.*, 2013). Acorde a esta información se puede relacionar como el calor que recibió el evaporador durante un tiempo desconocido después de evaporada el agua, expuso a los sólidos obtenidos a cierta temperatura. Situación que expone la posibilidad de una volatilización de sales en solución ya que a partir de los 300 °C, las sales son volátiles (Valero *et al.*, 2001).

## 5.4 Conclusiones

El T2 obtuvo la mayor cantidad de agua saliente, sin embargo al igual que en los demás tratamientos, la calidad de agua resultante no es adecuada para consumo humano. Se puede confirmar que con la cantidad de agua obtenida, a comparación de los sistemas tradicionales, el sistema obtuvo un alto porcentaje de eficiencia en recuperación de agua, lo cual lo convierte en una buena alternativa.

El mejor tiempo de gasificación registrado en las pruebas, correspondió a los tratamientos T2 y T3. Se descarta por el momento el uso de la fibra natural, como biomasa de importancia para el proceso de gasificación, en vista de los problemas registrados durante el proceso de encendido. Según la información recolectada, este tipo de fibra posee un 1 % más del rango adecuado en contenido de humedad lo cual podría explicar el inadecuado funcionamiento en la gasificación. El tamaño de partícula de la fibra, también se convirtió en uno de los factores que pueden haber inferido directamente en la gasificación. El T2 y T3, poseían un contenido de humedad adecuado, lo cual se evidenció en su funcionamiento a diferencia del T1, que según lo expuesto no pudo funcionar en vista de la condición en la que se evaluó.

El pH del agua no llegó al rango deseado, sin embargo se aproximó al valor establecido como permisible. El parámetro que estuvo dentro del rango aceptable fue el Na.

La calidad de agua se vio limitada por el DBO y DQO, que determinaron que el agua obtenida no es apta para el consumo humano según la OMS. Estos datos indican que el agua adquirida para el desarrollo del proyecto está en situación de contaminación lo cual induce a un problema ambiental en la zona en donde se tomó la muestra.

Los sistemas convencionales usan sistemas de pre y post-tratamiento, lo cual garantiza agua de excelente calidad. En comparación con esto, el agua entrante al sistema desalinizador desarrollado, no pasó por un pretratamiento y tampoco un pos-tratamiento al salir del sistema, lo cual lo pone en desventaja con las plantas desalinizadoras convencionales.

## 5.5 Recomendaciones

Considerar materiales que toleren condiciones de alta temperatura y que soporten la corrosión del agua de mar. El cuerpo del condensador hecho de PVC perdió consistencia al entrar en contacto con el calor proveniente del gasificador, por lo que es importante tomar en cuenta que la llama generada sea dirigida a un solo punto o que en el mejor de los casos se reemplace el tubo PVC por un tubo de acero inoxidable (Anexo 7).

Asegurar que el gasificador tenga una hornilla que permita sostener el evaporador y mantenga encerrada la llama para evitar pérdidas de calor, eso sí con entradas que le permitan tener oxígeno (Anexo 7). Por la práctica se pudo observar que el oxígeno suministrado por el ventilador del gasificador no es suficiente para que la llama se mantenga, por lo que sería bueno aumentar su potencia.

Aumentar la capacidad del gasificador o en caso de ser posible probar con un gasificador de lecho fluidizado (Anexo 7), el cual pueda permanecer durante varias horas en funcionamiento y así obtener más líquido resultante. Esto dependerá de la necesidad que se exponga y del fin del recurso. Si se aumenta la capacidad del gasificador se sugiere que la cantidad de agua que este entrando al sistema sea de flujo constante a una velocidad controlada, para disminuir la posibilidad de que efectivamente ciertas sales puedan volatilizarse y terminar en líquido extraído del sistema.

En cuanto a la alimentación del gasificador, la fibra de coco se debería someter a ciertas condiciones antes de entrar al sistema. La de tipo natural se secó por un lapso de 3 h, a lo que la literatura comenta que debe ponerse al menos dos días al sol. El tamaño de sustrato también es importante, por lo cual se aconseja que se corten en pedazos mayores a 0,03 m y menores a 0,10 m.

En cuanto al agua a utilizar en el sistema, es importante que se le otorgue cierto tratamiento antes de entrar al sistema y posterior a la salida. A esto se le puede sumar la elaboración de un filtro con el producto carbonizado obtenido después del proceso de gasificación. Esto podrá otorgar cierto nivel de confianza en cuanto a la calidad de agua saliente, sin embargo no se puede asegurar que así sea sin un estudio de por medio.

Realizar más evaluaciones al sistema, considerando una modificación en estructura, estandarización de procesos, funcionamiento, materia prima y pre y post tratamiento del agua. Además de un análisis elemental y análisis de inmediato de la biomasa, con la finalidad de conocer la cantidad de aire u oxígeno que es necesario introducir como primera aproximación contrastada en la práctica y la información sobre carbono fijo, volátiles, humedad y cenizas para seleccionar el tiempo de residencia en el reactor.

## 6 Lista de Referencias Bibliográficas

- Borja Montaña, S. 2011. *Análisis económico de la desalinización* [Tesis PhD]. Alicante (ES): Universidad de Alicante, Departamento de Análisis Económico Aplicado. 344 p.
- Casero Rodríguez, D. 2007. *Desalación* [Tesis MSc Ing. Medioambiental y Gestión del Agua]. Madrid (ES): Escuela de Organización Industrial (EOI). 48 p.
- Castellano Belmar, A. 2014. *Diseño de un reactor continuo de gasificación de biomasa* [Tesis Ing. Civil Químico]. Santiago de Chile: Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Química y Biotecnología. 118 p.
- Cifuentes Lemus, JL; Torres García, M. y Fría, M. 2013. *El océano y sus recursos II; La composición química del agua del mar* [en línea], vol. 1 [consultado 31 de octubre 2017] Disponible en el World Wide Web: <[http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/12/hm/sec\\_16.html](http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/12/hm/sec_16.html)>.
- Cortez, L.; Perez, J.; Rocha, J.; Jordan, R. y Mesa, H. 2009. Processamento de casca e fibra de coco verde por carbonização para agregação de valor; processing of coconut shell and fiber for adding value. *BioEng*, vol.3. no.1, 22-30p.
- Dévora Isiordia, GE.; González Enríquez, E. y Ruiz Cruz, S. *Evaluación de procesos de desalinización y su desarrollo en México* [en línea], vol. 4, no 3 [consultado 31 de octubre 2017] p 27-46. Disponible en el World Wide Web: <<http://www.scielo.org.mx/pdf/tca/v4n3/v4n3a2.pdf>>.
- Dévora, I.; González, G.; Ponce, R. y Fernández, N. 2012. *Técnicas para desalinizar agua de mar y su desarrollo en México* [pdf]. El Fuerte (MX). 13 p. [consultado 24 septiembre 2017]. Disponible en el World Wide Web: <<http://www.redalyc.org/pdf/461/46123333006.pdf>>.
- Di Rienzo, JA.; Casanoves, F.; Balzarini, MG.; González, L.; Tablada, M. y Robledo, CW. 2014. *InfoStat: software estadístico* [programa de cómputo]. Versión 2016. Córdoba (AR): Universidad Nacional de Córdoba, Grupo InfoStat. Disponible para descarga en el World Wide Web: <<http://www.infostat.com.ar>>.
- Fallas, J. 2012. *Análisis de varianza* [pdf]. 51 p. [consultado 3 noviembre 2017]. Disponible en el World Wide Web: <[http://www.ucipfg.com/Repositorio/MGAP/MGAP-05/BLOQUE-ACADEMICO/Unidad-2/complementarias/analisis\\_de\\_varianza\\_2012.pdf](http://www.ucipfg.com/Repositorio/MGAP/MGAP-05/BLOQUE-ACADEMICO/Unidad-2/complementarias/analisis_de_varianza_2012.pdf)>.
- Fernández, F.; Gutiérrez, P.; Del Río, G.; Alfaro, A.; Bahillo, J.M.; Sánchez, M.; Ballesteros, JA.; Vásquez, J.; Aracil, M. y Rodríguez, LM. 2015. *Tecnologías para el uso y transformación de biomasa energética*. 3a ed. Madrid (ES): Ediciones Mundi-Prensa. 442 p. ISBN 978-84-8476-674-2.
- García Fernández, L. 2011a. *Obtención de gas combustible a partir de la gasificación de biomasa en un reactor de lecho fijo* [Tesis MSc Ing. Mecánica]. Bogotá (CO): Universidad de Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería. 95 p.
- García Patiño, H. 2011b. *Modelación de la gasificación de biomasa en un reactor de lecho fijo* [Tesis MSc Ing. Mecánica]. Bogotá (CO): Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería. 104 p.
- García, M.; Shen, J.; Wang, X. y Chun-Zhu L. 2010. Production and fuel properties of fast pyrolysis oil/bio-diesel blends. *Fuel Processing Technology* [en línea], marzo, vol. 91, no. 3 [consultado 8 octubre 2017], p. 296-305. Disponible en el World Wide Web: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378382009003245>>.
- Google Earth [programa de información geográfica]. 2016a. *Taller didáctico* [consultado 2 octubre 2017]. 9 marzo 2016. 10°13'05" N y 83°35'37" O. 36 m.

- Google Earth [programa de información geográfica]. 2016b. *Google Maps* [consultado 2 octubre 2017]. 9 marzo 2016. Guácimo, EARTH: 10°12'38" N y 83°34'52" O. 773 m.
- Heraz Segura, A. 2012. *Estudio de gasificación mediante un prototipo experimental para el tratamiento termoquímico de residuos orgánicos* [Tesis MSc Ing. Química]. Ciudad de México: Universidad Iberoamericana. 122 p.
- Herrera Gómez, J. 2011. *Evaluación de los sustratos: fibra de coco, compost: arena y compost: arena: suelo: casulla de arroz para producción de crisantemo (Dendrathera x grandiflorum kitamura) en macrotúnel* [Tesis Ing. Agrónomo]. Francisco Morazán (HN): Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Facultad de Ingeniería Agronómica. 18 p.
- IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, ES). 2007a. *Energía de la biomasa* [pdf] 140 p. [consultado 10 setiembre 2017]. Disponible en el *World Wide Web*: <[http://nol.infocentre.es/ictnol/pdf/manual\\_biomasa.pdf](http://nol.infocentre.es/ictnol/pdf/manual_biomasa.pdf)>.
- IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, ES). 2007b. *Biomasa y gasificación* [pdf] vol. 1, no. 1 [consultado 10 setiembre 2017], p. 36. Disponible en el *World Wide Web*: <[http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos\\_10737\\_Biomasa\\_gasificacion\\_07\\_d2\\_adcf3b.pdf](http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10737_Biomasa_gasificacion_07_d2_adcf3b.pdf)>.
- Lamela, A. 2004. *Desalinización (o desalación) de agua de mar* [pdf] *Cuenta y Razón*, 13 p. Ensayo, no. 130.
- Leon Gil, C. 2009. *Estandarización y validación de una técnica para medición de la demanda bioquímica de oxígeno por el método respirométrico y la demanda química de oxígeno por el método colorimétrico* [Tecnólogo Químico]. Pereira (CO): Universidad tecnológica de Pereira: Facultad de tecnología: Escuela de tecnología química: Programa de tecnología química. 103 p.
- Ministerio de Sanidad, Servicios Sociales e igualdad del gobierno de España. 2009. *Guía de Desalación: aspectos técnicos y sanitarios en la producción de agua de consumo humano*. Madrid (ES): Ministerio de Sanidad y Política Social. 205 p.
- Montoya, J.; Chejne, F.; Gómez, C.; Valdés, C.; Osorio, J.; Blanco, A.; Marrugo, G.; Ospina, Y.; Castillo, E.; Acero, J.; Sarmiento, J.; Garzón, L.; Tirado, D. y Moreno, N. 2013. *Pirólisis rápida de biomasa*. 1a ed. Medellín (CO): Universidad Nacional de Colombia. 196 p. ISBN 978-958-761-774-0.
- ONU (Organización de las Naciones Unidas). 2017. *Océanos y derecho al mar* [sitio de Internet] [consultado 10 setiembre 2017]. Disponible en el *World Wide Web*: <<http://www.un.org/es/sections/issues-depth/oceans-and-law-sea/index.html>>.
- Ramilo, L.; Gómez, S. y Coppari, N. 2003. *Tecnologías de proceso para desalinización de aguas* [pdf]. Buenos Aires (AR). 6 p. [consultado 24 setiembre 2017]. Disponible en el *World Wide Web*: <[http://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4\\_uibd.nsf/4D880B81E22FB8F30525811A0062C2A0/\\$FILE/desalinizacion\\_de\\_aguas.pdf](http://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/4D880B81E22FB8F30525811A0062C2A0/$FILE/desalinizacion_de_aguas.pdf)>.
- Reed, T. y Das A. 1988. *Handbook of biomass downdraft gasifier engine systems*. Colorado (US): Instituto de Investigación de Energía Solar; Departamento de Energía de Estados Unidos. 140 p. Categoría 245. SERI/SP-271-3022. ISBN 1-890607-00-2.
- Silva de Paz, D. y Silva Zarate, J. 2015. *Desalinizador de agua de mar* [pdf]. 22 p. [consultado 9 octubre 2017]. Disponible en el *World Wide Web*: <[http://www.feriadelasciencias.unam.mx/anteriores/feria23/feria124\\_05\\_desalinizador\\_de\\_agua\\_de\\_mar.pdf](http://www.feriadelasciencias.unam.mx/anteriores/feria23/feria124_05_desalinizador_de_agua_de_mar.pdf)>.

- SketchUp [programa de diseño gráfico]. 2016. Versión 17.2.2555. Disponible para descarga en el *World Wide Web*: <<https://www.sketchup.com/es/download/all>>.
- Tooy, D.; Nelwan, L. y Pangkerego, F. 2014. Evaluation of biomass gasification using coconut husks in producing energy to generate small-scale electricity. *In Conference on Artificial Intelligence, Energy and Manufacturing Engineering (ICAEME'2014)*. Kuala Lumpur (MY). p. 84-88.
- UNESCO (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura). 2013. *Desalación de agua de mar mediante sistema osmosis inversa y energía fotovoltaica para provisión de agua potable en Isla Damas, Región de Coquimbo*. Montevideo (UY). 71 p. Documentos Técnicos del PHI-LAC, N° 33. ISBN 978-92-9089-192-5.
- Universidad EARTH. 2016. *Base de datos climáticos* [documento en Excel]. Guácimo (CR). Actualizado mensualmente.
- Valero, A.; Uche, J. y Serra, L. 2001. *La desalación como alternativa al PHN*. [en línea] [consultado 31 de octubre 2017], p 6-108. Disponible en el *World Wide Web*: <<https://www.uv.es/choliz/Desalacion.pdf>>.
- Zhen Wu, B. 2009. *Calidad físico-química y bacteriológica del agua para consumo humano de la microcuenca de la quebrada Victoria, Curubandé, Guanacaste, Costa Rica, año hidrológico 2007-2008* [Tesis MSc en en Manejo de Recursos Naturales con Mención en Gestión Ambiental]. San José (CR): Universidad Estatal a Distancia Vicerrectoría Académica Escuela de Ciencias Exactas Y Naturales: Programa de Maestría en Manejo de Recursos Naturales. 185 p.

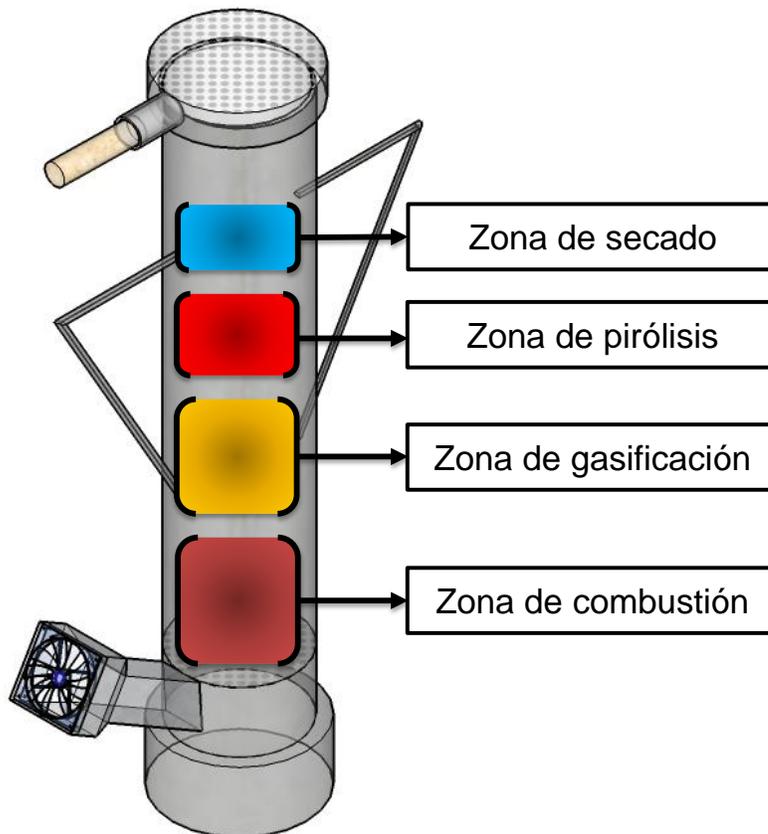
## 7 Anexos

### 7.1 Anexo 1. Costos de construcción del sistema desalinizador.

Componentes	CRC	USD †
Gasificador	12.634,77	22,42
Evaporador	81.508,52	144,65
Condensador	79.111,17	140,39
Estructura de soporte	62.604,32	111,09
<b>Total</b>	<b>235.858,78</b>	<b>418,55</b>

† Considerando un cambio de CRC 563,5.

### 7.2 Anexo 2. Esquema de las zonas de descomposición térmica de la biomasa en el gasificador.



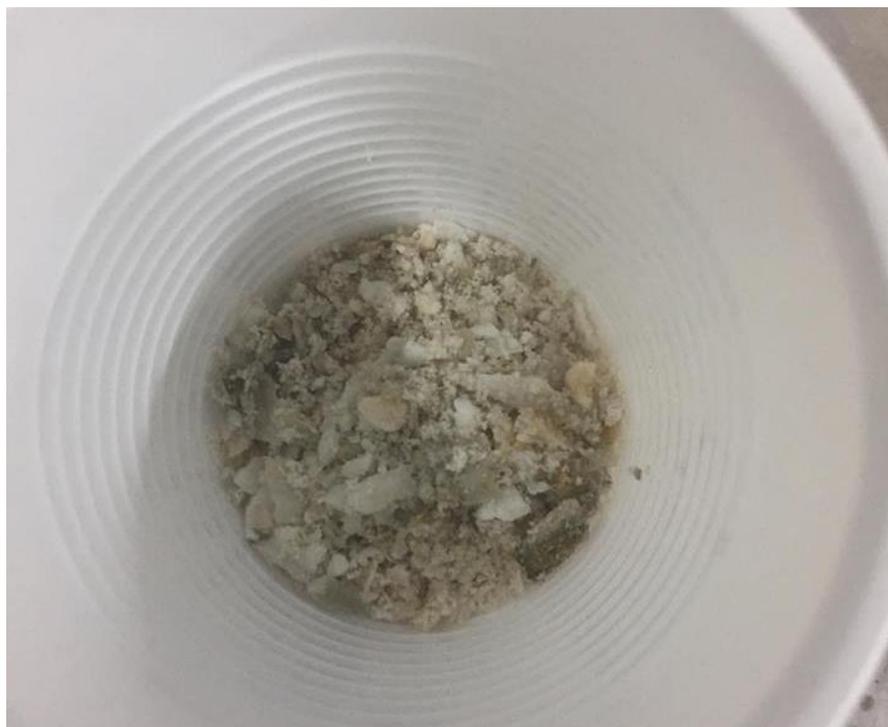
### 7.3 Anexo 3. Agua saliente de las pruebas con repeticiones por tratamiento.

T1			T2			T3		
Repeticion #1	Repeticion #2	Promedio	Repeticion #1	Repeticion #2	Promedio	Repeticion #1	Repeticion #2	Promedio
-----mL-----								
80	0	40	976,6	800	888,3	440	300	370

**7.4 Anexo 4.** Resumen del análisis químico del testigo y los tres tratamientos.

Parámetro	Agua de mar	T3	T1	T2
pH	8,42	5,94	6,24	6,14
DBO (mg/L)	180	180,00	80,00	60,00
DQO (mg/L)	776	340,00	136,00	106,50
Na (mg/L)	12 193	16,02	-	113,45

**7.5 Anexo 5.** Imagen de la sal resultante de la prueba con T2.



**7.6 Anexo 6.** Datos de la prueba de temperatura en quemador de todos los tratamientos.

T1		T2		T3	
Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Temperatura (°C)
5	345,5	5	366	5	285
10	310,5	30	341	30	214,5
		60	353	48	224
		78,5	299,5		

**7.7 Anexo 7.** Diseño tridimensional del prototipo recomendado con modificaciones en el sistema desalinizador propuesto.

