

**UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN - TACNA**

**Escuela de Posgrado**

**DOCTORADO EN CIENCIAS AMBIENTALES**

**EVALUACIÓN COMPARATIVA DE TRES SISTEMAS  
DE DESTILACIÓN SOLAR DE UN FERMENTADO  
DE SUBPRODUCTOS FRUTÍCOLAS PARA LA  
OBTENCIÓN DE BIOETANOL EN TACNA**

**TESIS**

**PRESENTADA POR:**

**M.Sc. EFREN EUGENIO CHAPARRO MONTOYA**

**Para optar el Grado Académico de:**

**DOCTOR EN CIENCIAS AMBIENTALES**

**TACNA - PERÚ**

**2016**

**UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN-TACNA**  
**Escuela de Posgrado**

**DOCTORADO EN CIENCIAS AMBIENTALES**

**EVALUACIÓN COMPARATIVA DE TRES SISTEMAS DE DESTILACIÓN  
SOLAR DE UN FERMENTADO DE SUBPRODUCTOS FRUTÍCOLAS  
PARA LA OBTENCIÓN DE BIOETANOL EN TACNA**

Tesis sustentada y aprobada el 7 de octubre del año 2015, estando el jurado calificador integrado por:

**Presidente**

:

  
\_\_\_\_\_  
**Dr. Oscar Octavio Fernández Cutire**

**Secretario**

:

  
\_\_\_\_\_  
**Dr. Pablo Juan Franco León**

**Miembro**

:

  
\_\_\_\_\_  
**Dra. Justa Agapita Machaca Mamani**

**Asesor**

:

  
\_\_\_\_\_  
**Dr. Ángel Canales Gutiérrez**

## **DEDICATORIAS**

- A mi padre Hipólito Chaparro Monasterio por su ejemplo perenne de honestidad y superación.
- A mis hermanos, en especial a Susan, por su aliento y cooperación.
- A mis sobrinos Kevin y Renzo por ser ellos mi fuente de inspiración.
- A mi abuelita Feliciano Colque Pacci que en paz descansa, mi fuerza interna para lograr superar cualquier obstáculo.

## **AGRADECIMIENTOS**

- **Al Dr. Ángel Canales Gutiérrez**, mi asesor, por su valiosa orientación;
- **Al Dr. Miguel Ángel Larrea Céspedes**, por sus orientaciones en la forma de presentación del presente informe;
- **Al MSC. Samuel Cerro Ruiz**, por su valioso apoyo y orientación en el presente trabajo de investigación;
- **Al Bach. Boris Milla Taco**, Gerente de la empresa ECOPROTEC quien me facilitó las cocinas solares.
- A todos los que motivaron y cooperaron a dar este paso importante, de invaluable costo por el constante aprender.

**Muchas gracias.**

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
Dedicatorias	iii
Agradecimientos	iv
Contenido	v
Índice de Tablas	x
Índice de figuras	xii
Resumen	xiv
Abstract	xv
Resumo	xvi
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>

## CAPÍTULO I

### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción del problema	3
1.2. Formulación del problema	4
1.3. Justificación e importancia	5

<b>1.4.</b> Alcances y limitaciones	6
<b>1.5.</b> Objetivos	6
<b>1.5.1</b> Objetivo general	6
<b>1.5.2</b> Objetivos específicos	6
<b>1.6.</b> Hipótesis	6

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

<b>2.1.</b> Antecedentes del estudio	8
<b>2.2.</b> Bases teóricas	12
<b>2.2.1.</b> Energía solar	12
<b>2.2.1.1.</b> Medida de la irradiancia solar	14
<b>2.2.2.</b> Destilador solar	14
<b>2.2.2.1.</b> Tipos de destiladores solares	15
<b>2.2.3.</b> Bioetanol	17
<b>2.2.3.1.</b> Características fisicoquímicas del bioetanol	17
<b>a.</b> Grado alcohólico volumétrico	17
<b>b.</b> pH	17
<b>c.</b> Extracto seco	18
<b>d.</b> Ésteres	19

<b>e. Furfural</b>	20
<b>f. Aldehídos</b>	20
<b>g. Alcoholes superiores</b>	21
<b>h. Acidez volátil</b>	22
<b>i. Metanol</b>	22
<b>2.3. Definición de términos</b>	23
<b>2.3.1. Fermentación</b>	23
<b>2.3.2. Destilación</b>	23
<b>2.3.3. Etanol</b>	23
<b>2.3.4. Destilación solar</b>	24

### **CAPÍTULO III**

#### **MARCO METODOLÓGICO**

<b>3.1. Tipo y diseño de la investigación</b>	25
<b>3.1.1. Tipo de investigación</b>	25
<b>3.1.2. Diseño de la investigación</b>	25
<b>3.2. Población y muestra</b>	26
<b>3.3. Operacionalización de variables</b>	26
<b>3.4. Técnicas e instrumentos para la recolección de datos</b>	28
<b>3.4.1. Técnicas para la recolección de datos</b>	28

<b>3.4.2. Instrumentos para la recolección de datos</b>	32
<b>3.4.2.1. Materiales y equipos</b>	32
<b>a. Materiales</b>	32
<b>b. Equipos</b>	33
<b>3.4.2.2 Reactivos</b>	33
<b>3.5. Procesamiento y análisis de datos</b>	34

## **CAPÍTULO IV**

### **RESULTADOS**

<b>4.1. Construcción de tres sistemas de destilación solar</b>	36
<b>4.2. Evaluación del tiempo de destilación solar y volumen obtenido de bioetanol a partir de un fermentado de subproductos frutícolas</b>	40
<b>4.2.1. Fermentado de subproductos frutícolas para la obtención de bioetanol</b>	40
<b>4.2.2. Seguimiento del tiempo de destilación solar y volumen de bioetanol</b>	41
<b>4.2.3. Análisis de varianza y prueba de contraste múltiple de Tuckey del tiempo de destilación solar</b>	46
<b>4.3. Análisis fisicoquímico del producto final obtenido</b>	48
<b>4.3.1. Extracto seco</b>	48

4.3.2. pH	50
4.3.3. Ésteres totales	51
4.3.4. Acidez volátil (acética)	54
4.3.5. Furfural	56

## **CAPÍTULO V**

### **DISCUSIÓN**

5.1. Construcción de tres sistemas de destilación solar	59
5.2. Evaluación del tiempo de destilación solar y volumen obtenido de bioetanol a partir de un fermentado de subproductos frutícolas	60
5.3. Análisis fisicoquímico del producto final obtenido	63
<b>CONCLUSIONES</b>	67
<b>RECOMENDACIONES</b>	69
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICA</b>	70
<b>ANEXOS</b>	79

## ÍNDICE DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 1.</b> Porcentajes de las distintas partes de la uva	16
<b>Tabla 2.</b> Tipos, descripción y características generales de destiladores solares	27
<b>Tabla 3.</b> Análisis de varianza del tiempo de destilación solar	46
<b>Tabla 4.</b> Prueba de rango múltiple de Tuckey ( $p=0,05$ ): Destilación solar	47
<b>Tabla 5.</b> Análisis de varianza del contenido de extracto seco (mg/L)	48
<b>Tabla 6.</b> Prueba de rango múltiple de Tuckey ( $p=0,05$ ): Extracto seco (mg/L)	49
<b>Tabla 7.</b> Análisis de varianza del pH	50
<b>Tabla 8.</b> Análisis de varianza del contenido de ésteres	52
<b>Tabla 9.</b> Prueba de rango múltiple de Tuckey ( $p=0,05$ ): Ésteres (mg/100 ml AA)	53
<b>Tabla 10.</b> Análisis de varianza del contenido de acidez volátil (ácido acético)	54
<b>Tabla 11.</b> Prueba de rango múltiple de Tuckey ( $p=0,05$ ): Ácido acético (mg/100 ml AA)	55

<b>Tabla 12.</b> Análisis de varianza del contenido de furfural	57
<b>Tabla 13.</b> Prueba de rango múltiple de Tuckey ( $p=0,05$ ): Furfural (mg/L AA)	58
<b>Tabla 14.</b> Destilación solar 1: Cocina solar ck-002 con un alambique de cobre	82
<b>Tabla 15.</b> Destilación solar 2: Cocina solar ck-002 con una olla de aluminio	83
<b>Tabla 16.</b> Destilación solar 3: Cocina solar sk-12 con un alambique de cobre	84

## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1.</b> Prototipo de destilador solar para obtener bioetanol	15
<b>Figura 2.</b> Principales etapas en el desarrollo del experimento	26
<b>Figura 3.</b> Componentes del destilador solar de fermentados ck-002 con olla de cobre sin estaño de 5 L de capacidad	38
<b>Figura 4.</b> Componentes del destilador solar de fermentados ck-002 con olla de aluminio de 5 L de capacidad	30
<b>Figura 5.</b> Componentes del destilador solar de fermentados sk-12 con olla de cobre sin estaño de 5 L de capacidad	40
<b>Figura 6.</b> Componentes del fermentado de subproductos frutícolas	41
<b>Figura 7.</b> Volumen de bioetanol vs tiempo de destilación solar con una cocina solar ck-002 y alambique de cobre	43
<b>Figura 8.</b> Volumen de bioetanol vs tiempo de destilación solar con una cocina solar ck-002 y olla de aluminio	44
<b>Figura 9.</b> Volumen de bioetanol vs tiempo de destilación solar con una cocina solar sk-12 y alambique de cobre	45
<b>Figura 10.</b> Tiempo de destilación solar por tratamiento	47

<b>Figura 11.</b> Contenido de extracto seco (mg/L) de las tres muestras de bioetanol.	49
<b>Figura 12.</b> pH de las tres muestras de bioetanol.	51
<b>Figura 13.</b> Contenido de ésteres (mg/100 ml AA) de las tres muestras de bioetanol.	53
<b>Figura 14.</b> Contenido de ácido acético (mg/100 ml AA) de las tres muestras de bioetanol.	56
<b>Figura 15.</b> Contenido de furfural (mg/L AA) de las tres muestras de bioetanol.	58

## RESUMEN

El presente trabajo de investigación tuvo como finalidad evaluar la comparación de tres sistemas de destilación solar de un fermentado de subproductos frutícolas para la obtención de bioetanol en Tacna. La muestra de sandía e higos provinieron de Magollo-Tacna, se utilizó un diseño con tres tratamientos y tres repeticiones, en cada proceso de destilación solar se empleó 4 L de fermentado. Los resultados fueron: Se construyó tres sistemas de destilación con las siguientes características: Cocina solar ck-002 y alambique de cobre pintada de negro (T1), peso total 12,60 kg, temperatura máxima en el eje focal 764 °C; cocina solar ck-002 y olla de aluminio pintada de negro (T2), peso total 11,40 kg, temperatura máxima en el eje focal 764 °C; cocina solar sk-12 y alambique de cobre pintada de negro (T3), peso total 40,80 kg, temperatura máxima en el eje focal 389 °C; se destiló 4 L de vino base del fermentado de subproductos frutícolas (sandía e higos) y se obtuvo 480 ml (12 %) en cada sistema de destilación solar, resultando el más eficiente en el tiempo con un 95 % de confianza el destilador con una cocina solar ck-002 y olla de aluminio con 49 min.

**Palabras clave:** Fermentado, destilación solar y bioetanol.

## ABSTRACT

The purpose of this research is to evaluate the comparison of three systems of solar distillation of fermented fruit products for the production of bioethanol in Tacna - Peru. The sample of watermelon and figs came from Magollo-Tacna. A three treatments and three repetitions in each solar distillation process of fermented 4 L experimental design was used. The results were: three sets of distillation with the following characteristics was built: ck-002 solar cooker and copper still painted black (T1), total weight 12,60 kg, maximum temperature in the focal axis 764 °C; ck-002 solar cooker and aluminum pot painted black (T2), total weight 11,40 kg maximum temperature in the focal axis 764 °C; sk-12 solar cooker and copper still painted black (T3), total weight 40,80 kg, maximum temperature in the focal axis 389 °C. Distilled 4 L base of fermented fruit products (watermelon and figs) wine and 480 ml (12 %) was obtained in each system of solar distillation, resulting in more efficient over time with 95 % confidence distiller with a ck-002 solar cooker and aluminum pot with 49 min.

**Keywords:** Fermented, solar distillation and bioethanol.

## RESUMO

Esta pesquisa teve como objetivo avaliar a comparação dos três sistemas de destilação solar de produtos fermentados de frutas para a produção de bioetanol em Tacna - Perú. A amostra de melancia e figos veio de Magollo-Tacna. Um projeto com três tratamentos e três repetições em cada processo de destilação solar de fermentado 4 L foi usado. Os resultados foram os seguintes: três conjuntos de destilação com as seguintes características de fabrico: O cozimento solar CK-002 e cobre ainda pintada de preto (T1), o total de 12,60 kg de peso, a temperatura máxima no eixo focal 764 °C; o cozimento solar ck-002 de alumínio e pote solare pintado de preto (T2), o total de 11,40 kg de peso, temperatura máxima no eixo focal 764 °C; o cozimento solar SK-12 e cobre ainda pintada de preto (T3), o total de 40,80 kg de peso, a temperatura máxima no eixo focal 389 °C. Destilada base 4 L de produtos fermentados de frutas (melancia e figos) e vinho 480 ml (12 %) foi obtido em cada sistema de destilação solar, resultando em mais eficiente ao longo do tempo com 95 % de confiança com um destilador, um cozimento solar ck-002 e panela de alumínio com 49 min.

**Palavras-chave:** fermentado, destilação solar e bioetanol.

## INTRODUCCIÓN

Entre los numerosos usos de las energías renovables que presentan interés para su aprovechamiento en el mundo entero, se encuentra la energía solar.

El costo por su uso y contaminación al medio ambiente es bajo, el protocolo de Kyoto para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero es una de las medidas que los países pueden tomar para paliar los desequilibrios climáticos.

A nivel nacional existe buena irradiancia solar, sin embargo, no viene siendo aprovechado para reemplazarlo en los diferentes procesos (desinfección, deshidratación, destilación, cocción de alimentos y otros), donde se haga uso de la energía convencional.

En la actualidad, en el proceso de destilación para la obtención de aguardientes se utilizan energías no renovables a base de leña y gas que contaminan el medio ambiente a través de la producción de dióxido de carbono, ocasionando el calentamiento global de la tierra.

En la tesis titulada “Empleo de la energía solar en la operación de destilado para la obtención de pisco puro Italia” trabajo de investigación realizado en Tacna con una cocina solar SK-12, un solarímetro y un alambique de cobre sin estañar de 5 L de capacidad, se reportó que la mayor irradiancia solar de 962 a 1 043 W/m<sup>2</sup> estuvo entre las 11:00 a 14:00 h con rendimientos entre 27,5 % a 31 % de cuerpo de pisco puro Italia a partir de un vino base de 3 L (Chaparro 2005a).

En el presente estudio se compara tres sistemas de destilación solar que permiten determinar cuál es el mejor para la obtención de bioetanol de buena calidad a partir de un fermentado de subproductos frutícolas en Tacna.

## **CAPÍTULO I**

### **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

#### **1.1 Descripción del problema**

##### **1.1.1. Problemática de la investigación**

La energía solar es una fuente de energía renovable que se encuentra en cualquier lugar del planeta. A nivel internacional se viene utilizando la energía solar en procesos de cocción, destilación, para producir energía eléctrica entre otros usos.

En la actualidad en el proceso de destilación de aguardientes se utilizan energías no renovables a base de leña y gas que contaminan el medio ambiente a través de la producción de dióxido de carbono, ocasionando el calentamiento global de la tierra.

A nivel nacional se utiliza en forma limitada la energía solar térmica renovable en procesos de cocción y secado.

En Tacna el uso de la energía solar está destinado más para el secado de alimentos. En la zona agrícola de Tacna, existen frutas de descarte que consumen algunos animales y no se aprovechan para elaborar o producir un nuevo producto como el bioetanol que podría utilizarse como energía o podría ser consumido por el hombre.

## **1.2. Formulación del problema**

La interrogante general para el presente trabajo de investigación es el siguiente:

¿Cuál de los tres sistemas de destilación solar es el mejor durante la obtención de bioetanol a partir de un fermentado de subproductos frutícolas en Tacna?

Las interrogantes específicas son las siguientes:

¿Sería factible construir y controlar tres sistemas de destilación solar de un fermentado de subproductos frutícolas para obtener bioetanol?

¿Cuál de los tres sistemas de destilación solar es el más eficiente en el tiempo para la obtención de mayores volúmenes de bioetanol?

¿El bioetanol obtenido tendrá buenas características fisicoquímicas?

### **1.3. Justificación e importancia**

Con el propósito de dar una alternativa positiva para sustituir el uso de la energía convencional (gas, petróleo y leña), se realizará un estudio que permita usar la energía solar térmica renovable en procesos de destilación para la obtención de bioetanol.

Desde el punto de vista técnico ambiental, el estudio trata de brindar una alternativa de uso de la energía solar térmica renovable, mediante la utilización de tres destiladores solares para la obtención de bioetanol, sustituyendo a la energía convencional, lo que permitirá minimizar el impacto sobre el calentamiento global de la tierra.

Desde el punto de vista social, el uso de menores cantidades de energía convencional, como: a gas, petróleo o leña en la destilación, contribuirá a un desarrollo sostenible del planeta, disminuyendo la producción de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y mejorar así la calidad de vida.

Desde el punto de vista económico, la utilización de la energía solar térmica renovable usando tres destiladores solares para la obtención de bioetanol, disminuirá sus costos de producción.

#### **1.4. Alcances y limitaciones**

El presente trabajo de investigación tendrá como limitante el estado de nubosidad del día y la época de cosecha de las frutas en la provincia de Tacna.

#### **1.5. Objetivos**

##### **1.5.1. Objetivo general**

Evaluar la comparación de tres sistemas de destilación solar para la obtención de bioetanol a partir de un fermentado de subproductos frutícolas en Tacna.

##### **1.5.2. Objetivos específicos**

- Construir tres sistemas de destilación solar para obtener bioetanol.
- Evaluar el tiempo de destilación solar y volumen obtenido de bioetanol a partir de un fermentado de subproductos frutícolas.
- Analizar fisicoquímicamente el producto final obtenido.

## **1.6. Hipótesis**

La hipótesis general fue:

La destilación solar de un fermentado de subproductos frutícolas permite obtener bioetanol en Tacna.

Las hipótesis específicas fueron:

- Sí es posible construir tres sistemas de destilación solar.
- Sí se compara tres sistemas de destilación solar, entonces se determinará cuál de ellos es más eficiente en el tiempo para la obtención de mayores volúmenes de bioetanol.
- El análisis fisicoquímico del bioetanol obtenido permite determinar sus componentes.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Antecedentes del estudio

Se fermentó la pulpa de banano a diferentes temperaturas 16 a 30 °C, se obtuvo vino con rendimiento en promedio de alcohol de 8,95 % v/v y con contenido de azúcares inferiores de 5 g/L (Rocha *et al.*, 2007).

Se fermentaron jugos de naranja (natural, JN, o pasteurizado, JP) con *S. cerevisiae* a pH de 3,5 o 4,0; temperaturas de fermentación de 10 o 20 °C y de maduración de 10 o 20 °C. La producción de alcohol etílico fue mayor en los vinos elaborados con mosto de jugo de naranja pasteurizado de 80 a 85 g/L que en los elaborados con mosto de jugo natural de 60 a 80 g/L (Ferreyra *et al.*, 2009).

Durante seis días se fermentó la opundia a temperaturas entre 15 a 25 °C, se determinó los siguientes resultados: pH de 3,9; 11,56 grado Brix; acidez titulable de 4,97 g/L y grado alcohólico de 3,44 °G.L. el vino

obtenido correspondió a un vino avocado, que tuvo azúcares residuales con valores entre 5 y 10 g/L (Suescum, 2005).

El rango de concentraciones promedio de alcohol obtenidos para los vinos osciló entre 4,8 y 9,1 % v/v. Siendo los valores promedios más altos para la manzana con 9,1 % v/v, seguida por la pera con un 7,5 % v/v, la naranja con un 6,5 % v/v, la papaya con un 6,0 % v/v y la sandía con un 4,8 % v/v (Aguilar y Hernández, 2006).

Se reportó resultados de los niveles de azúcares totales y reductores encontrados para los subproductos de lima Tahití (274,92 y 219,04 g/L), para la cachaza de caña panalera (264,61 y 171,33 g/L) y para el bagazo de caña (197,64 y 99,82 g/L). La cachaza de caña tenía un pH=4,3 y 24,2 grado Brix. Los subproductos ideales para obtener bioetanol son: la cachaza de caña y los fitoresiduos de lima Tahití y de limón Común (Sánchez, 2010).

Se fermentó un mosto de manzana en 25 días, el cual tuvo un grado alcohólico de 4,2 °G.L; el grado alcohólico del producto destilado fue de 42,6 °G.L con un rendimiento de 12 % (volumen cuerpo obtenido de 3 000 ml) (Espin, 2008).

En la tesis titulada “Empleo de la energía solar en la operación de destilado para la obtención de pisco puro Italia” trabajo de investigación realizado en Tacna con una cocina solar SK-12, un solarímetro y un alambique de cobre sin estañar de 5 L de capacidad, se reportó un rendimiento máximo de 31 % de cuerpo (930 ml) de pisco puro Italia con 41 °G.L a partir de un vino base de 3 L, obtenido entre las 11:01 a 14:00 h con un tiempo de 168 min. (Chaparro, 2005a).

En un trabajo de investigación se desarrolló un prototipo de destilador continuo, utilizando energía solar en sustitución a los combustibles fósiles, para obtener bioetanol, se destiló 300 ml de vino de mango en un tiempo de 55 minutos, el máximo rendimiento se obtuvo a temperaturas ambientales mayores de 30 °C, en la parte interna del destilador tuvo una temperatura de  $69,17 \pm 2,72$  °C y con un rendimiento de 26,7 % (82 ml con  $17,00 \pm 0,03$  °GL) (Balcázar, 2008).

En el trabajo de investigación titulada “La teoría de la destilación solar al vacío”, realizado en una torre de bandejas de destilación en condiciones de presión y temperatura, reportaron una temperatura máxima en destilación de agua de 55 °C e indicaron que las producciones de agua destilada pueden aumentar hasta más de 100 Kg/día, por m<sup>2</sup> de

colector, para un día estándar de 1000 W/m<sup>2</sup> de radiación máxima (Fuentes y Roth, 1997).

En un estudio se determinó que la eficiencia del dispositivo en un destilador solar de agua es alta, esto es que un 72 % de la radiación solar es convertida en energía térmica. Por otro lado, mediante la definición de eficiencia combinada se concluye que el 58 % de la radiación solar es efectivamente utilizada en la producción de destilado y en el calentamiento de agua (Zizzias *et al.*, 2010).

Se acopló a una planta de destilación a escala piloto con una capacidad de 1,8 L/h de 95 % v/v de etanol. El promedio de captación solar diaria fue de 1,68 Kwh/m<sup>2</sup> días y la eficiencia de recolección fue de 28 % (Srinivasan, 1993).

Los compuestos obtenidos durante una destilación con energía a petróleo forman el cuerpo del pisco el cual representa el 23 % con 45 °G.L (Rivera, 1999).

Mediante un destilador solar de agua se obtuvo una producción media de 111,90 y 368,65 L/año para los periodos de lluvia y sequía

respectivamente (Chinappi *et al.*, 2007).

Un destilador solar tubular (DST) fue diseñado y operado bajo las condiciones ambientales del Estado Zulia, Venezuela, a fin de estudiar a escala piloto su eficiencia en la desalinización de agua y analizar su factibilidad para ser implementado a gran escala en comunidades rurales con problemas asociados a fuentes de agua salobre, y que cuentan con gran potencial de energía solar. Las condiciones ambientales tienen un efecto directo en los volúmenes de agua destilada producida y en menor medida en la calidad de la misma, obteniéndose un volumen medio de 2,42 L·m<sup>-2</sup>/día, con un máximo de 3,34 y mínimo de 0,93 L·m<sup>-2</sup>/día (Yabroudi, 2011).

## **2.2. Bases teóricas**

### **2.2.1. Energía solar**

La energía solar es la energía radiante producida por el sol como resultado de reacciones nucleares de fusión; llega a la Tierra a través del espacio en cuantos de energía llamados fotones, que interactúan con la atmósfera y la superficie terrestre (Satin, 2000).

El sol es una fuente de energía natural, limpia e inagotable. Cada año el sol vierte sobre la Tierra cuatro veces más energía de la que necesitamos. El ser humano ha aprovechado su energía desde el principio de los tiempos, aunque siempre de forma elemental. Hoy en día las necesidades energéticas no son las mismas que en épocas anteriores. Es por ello que el hombre moderno intenta aprovechar esta energía de forma más eficiente (Balcázar, 2008).

En la actualidad, la energía solar está siendo aprovechada para fines energéticos a través de dos vías basadas en principios físicos diferentes. Por un lado la vía térmica. Los sistemas que adoptan esta vía absorben la energía solar y la transforman en calor. Por otro lado, la vía fotovoltaica este permite la transformación directa de la energía solar en energía eléctrica mediante las llamadas "celdas solares" o "celdas fotovoltaicas". Dichas celdas hacen posible la producción de electricidad a partir de la radiación solar debido al efecto fotovoltaico, un efecto por el que se transforma directamente la energía luminosa en energía eléctrica y que se produce cuando la radiación solar entra en contacto con un material semiconductor cristalino (Huezo y Moran, 2012).

### **2.2.1.1. Medida de la irradiancia solar**

Para medir la irradiación solar total o global se usan piranómetros o solarímetros los que a su vez pueden ser fototérmicos o fotovoltaicos. La irradiancia es la potencia solar incidente en una superficie por unidad de área, sus unidades son  $W/m^2$  (Chaparro, 2005a).

### **2.2.2. Destilador solar**

Es un sistema diseñado de forma similar que el destilador, a energía convencional; consta de un concentrador de energía (cocina solar SK-12), un alambique de cobre pintado de color negro, un cuello de cisne y un sistema de enfriamiento (Chaparro, 2005a).

El destilador solar es un dispositivo que aprovecha el calentamiento de un colector con alta eficiencia y la discusión sobre su uso, como todos los sistemas solares, no debe ser por sus limitaciones termodinámicas (Toechia, Porta y Cervantes, 2007).

La destilación solar es un proceso que consiste en calentar un líquido utilizando un concentrador de energía solar hasta que sus componentes más volátiles pasan a la fase de vapor y a continuación, enfriar el vapor para recuperar dichos componentes en forma líquida por medio de la

condensación (Zizzias *et al.*, 2010).

En la figura 1 se muestra un prototipo de destilador solar para obtener bioetanol.



**Figura 1.** Prototipo de destilador solar para obtener bioetanol.

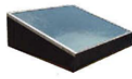

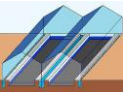
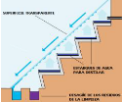
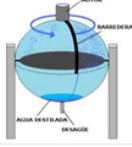
**Fuente:** Balcázar, 2008.

#### **2.2.2.1. Tipos de destiladores solares**

En la tabla 1 se presentan los tipos, descripción y características generales de destiladores solares que se puede hacer uso, como son: Destilador solar de una vertiente DS1, destilador solar de dos vertientes o tipo caseta DS2, destilador solar de invernadero DS3, destilador solar de cascada DS4, destilador solar esférico de barredera DS5.

**Tabla 1.**

Tipos, descripción y características generales de destiladores solares.

Tipos de destiladores solares	Descripción	Característica general	Diseño
<b>Destilador solar de una vertiente DS1</b>	Consta de una caja cubierta por un cristal inclinado. La caja está dividida en dos compartimentos: uno con el fondo de color negro donde se coloca el agua a evaporar y que ocupa la mayor parte de la caja y el otro el receptáculo donde se recoge el agua destilada y que se encuentra en el lado de menor altura.	Modelo de destilador más sencillo de estructura	
<b>Destilador solar de dos vertientes o tipo caseta DS2</b>	Consta de un “tejado” de material transparente de dos vertientes. La radiación del sol evapora el agua y luego condensa en el panel transparente se deslizan por los lados y precipitan a un depósito situado bajo la bandeja donde se dispone el agua para destilar.	Modelo más conocido y difundido en el mundo	
<b>Destilador solar de invernadero DS3</b>	Consta de una estructura de invernadero que en su interior alberga un estanque de agua de poca profundidad y con el fondo de color negro. El agua evaporada se condensa en las paredes del invernadero y se desliza hacia los receptáculos situados en la base de las paredes.	Modelo de destilador solar de gran tamaño	
<b>Destilador solar de cascada DS4</b>	Consta de terrazas, en la parte superior de cada una de las terrazas se disponen los estanques con fondo de color negro, llenos de agua para destilar. Cuando la radiación solar incide en el destilador comienza la evaporación. El agua en estado gaseoso se condensa en una superficie transparente dispuesta de forma inclinada sobre las terrazas y se desliza hacia el receptáculo situado en la parte baja del destilador.	Modelo con una mejor acumulación de energía térmica	
<b>Destilador solar esférico de barredera DS5</b>	Consta de una esfera de material transparente así como de la introducción de una barredera que se desliza en su cara interna, accionada por un pequeño motor. En una bandeja con fondo de color oscuro situada en la parte central de la esfera se coloca el agua a destilar.	Modelo más complejo y eficiente	

Fuente: Huevo y Moran, 2012.

### **2.2.3. Bioetanol**

El bioetanol que proviene de los campos de cosechas tras una fermentación y destilación se perfila como un recurso energético potencialmente sostenible que puede ofrecer ventajas ambientales y económicas a largo plazo en contraposición a los combustibles fósiles; sin embargo, los actuales métodos de producción de bioetanol utilizan una cantidad significativa de energía en comparación al del combustible producido (Balcázar, 2008).

#### **2.2.3.1. Características fisicoquímicas del bioetanol**

##### **a. Grado alcohólico Volumétrico (Graduación alcoholimétrica de volumen, título volumétrico, ex-título real)**

El grado alcohólico volumétrico de una mezcla hidroalcohólica es la relación entre el volumen de alcohol en estado puro, a la temperatura de 20 °C, contenido en dicha mezcla y el volumen total de ésta última a la misma temperatura. Se expresa en partes de alcohol por cien partes de mezcla y su símbolo es % Alc. Vol. (NTP 211.020 2003).

##### **b. pH**

El valor del pH en este caso, es la expresión del grado de acidez de una solución. El pH es la escala que mide la fuerza de un ácido o de una

base. Una solución con pH entre 7 y 14 se considera alcalina, mientras que una solución con pH menor a 7 es considerada ácida y un pH de 7 corresponde a un valor neutro, y mientras más se aleje de este valor, mayor será la fuerza de la solución.

La quema de levadura en un tubo de ensayo libera amoníaco y agua, en soluciones acuosas, el amoníaco desprotona una pequeña fracción del agua para dar iones de amonio e hidróxido lo cual aumenta ligeramente el pH del agua (Valera y Victorino, 2006).

### **c. Extracto seco**

El extracto seco es el conjunto de todas las sustancias que en condiciones físicas determinadas no se volatilizan. Está compuesto por lo general de minerales, tales como: el hierro y el cobre; y otros pero en ínfimas proporciones como: el boro, zinc, manganeso, etc.

Se determinó que durante la destilación de vinos base para la obtención de pisco, el nivel de cobre en las fracciones de cabeza de un alambique sucio es casi el doble que el de un alambique limpio (Palma, 2005).

#### **d. Ésteres**

Los ésteres se forman por reacción bioquímica de los alcoholes, por reacción de un ácido graso y etanol (proceso de esterificación) o por biosíntesis de lípidos, esto ocurre durante la fermentación también durante la destilación; las transformaciones de esterificación se producen en medio ácido, otras condiciones que lo favorecen son la temperatura, turbiedad, proporción de cabeza y cola (Chaparro, 2005a).

El hecho de aumentar el porcentaje de fangos en el vino a destilar incrementa la producción de ésteres (Rodríguez *et al.*, 2003).

En una investigación reportaron que la acidez volátil en el pisco puro de uva Quebranta, tiene una relación casi directa en el contenido de ésteres (Linares *et al.*, 2006).

Durante la destilación por efecto del calor hay lisis de levaduras (rompimiento de sus membranas celulares), liberando los ácidos grasos y éste reacciona con el etanol produciéndose ésteres aumentando su contenido en el pisco (Hatta, 2009).

#### **e. Furfural**

El furfural es un producto que resulta de la oxidación de ciertas sustancias azucaradas. Existe en el vino mosto y se forma también durante la destilación bajo la influencia del calor sobre ciertas pentosas (Torres y Alférez, 2003).

La formación del furfural tiende a darse en largas destilaciones, concentraciones elevadas de azúcares en el mosto y no es de buen agrado gustativo (Concha, 2003).

El contenido de sólidos de fermentación del mosto en la destilación, sí influyen en el contenido final de furfural en el pisco (Chávez *et al.*, 2003).

#### **f. Aldehídos**

Se forma durante la fermentación por descarboxilación del piruvato, por oxidación de alcoholes y la descarboxilación de otros cetoácidos (Torres y Alférez, 2003).

Al actuar sobre el ácido crómico el alcohol etílico primario puede oxidarse a aldehído conocido como acetaldehído (Graham, 1996).

### **g. Alcoholes superiores**

Son productos secundarios de la fermentación alcohólica y del metabolismo de las levaduras, es decir, compuestos producidos por autólisis y autodigestión de las levaduras a partir de ácidos grasos y aminoácidos (leucina, tirosina, isoleucina, fenil alanina). La cantidad de estos alcoholes depende de la especie o raza de levadura y tiempo de fermentación (Torres y Alférez, 2003).

Las levaduras son capaces de sintetizar todos sus aminoácidos a partir del nitrógeno amoniacal y cuando tiene a su disposición nitrógeno amoniacal, como única fuente de alimentación nitrogenada, producen bajísimas cantidades de alcoholes superiores del orden de 60 mg/L. Cuando por el contrario, se ofrecen a las levaduras, como única fuente de nitrógeno, un aminoácido, y por consiguiente, es necesaria una desaminación, se tiene una notable producción de alcoholes superiores, más de 600 mg/L y hasta más de 1 g/L (Concha, 2003).

Los alcoholes superiores son elementos de elevado peso molecular y en el pisco se encuentra el Iso-Propanol, Propanol, Butanol, Iso-Butanol e Iso-Teramílico. Su conjunto constituye el aceite de fusel o aceite de flema, que es el producto de la destilación que pasa con las últimas fracciones

del alcohol etílico; de allí que también se les llaman alcoholes de cola (Monasterio, 1996).

#### **h. Acidez volátil**

La acidez del pisco está dada principalmente por la acidez volátil del vino (Chambilla, 2005).

La acidez acética se forma a partir de la descarboxilación oxidativa del ácido pirúvico, en el metabolismo de las levaduras. Su concentración depende del tipo o especie de levadura, temperatura de fermentación, método de destilación y estado sanitario de la uva (Torres y Alférez, 2003).

La acidez acética se obtiene en mayor cantidad al final del proceso de destilación del mosto fermentado de uva Italia (Hatta, 2009).

#### **i. Metanol**

Se forma a partir de las pectinas de la uva por acción de las pectinometilesterasas de la propia fruta en la fermentación alcohólica. Su concentración en el pisco depende del tipo de maceración (con o sin

orujo), forma de destilación, tiempo de maceración y temperatura de fermentación (Torres y Alférez, 2003).

## **2.3. Definición de términos**

### **2.3.1 Fermentación**

La fermentación es un proceso catabólico de oxidación incompleta, totalmente anaeróbico, siendo el producto final un compuesto orgánico (Noguera, 1974).

### **2.3.2. Destilación**

Es la operación a través de la cual los compuestos volátiles de un vino son vaporizados y posteriormente condensados, y se efectúa en aparatos denominados “alambiques” o “falcas”, de características específicas al producto que se quiere obtener (Monasterio, 1996).

### **2.3.3. Etanol**

El compuesto orgánico cuya fórmula química es  $C_2H_5OH$ . Se presenta como un líquido incoloro, límpido, de olor agradable y fuertemente penetrante, de sabor cáustico y ardiente, además es miscible con agua en toda proporción. Industrialmente se obtiene por fermentación alcohólica o por síntesis química. Cuando se obtiene por fermentación, se

le utiliza principalmente en la elaboración de bebidas alcohólicas, en la industria farmacéutica, en perfumería y en la industria de aromas (NTP 211.020, 2003).

#### **2.3.4. Destilación solar**

Proceso que consiste en calentar un líquido utilizando un concentrador de energía solar hasta que sus componentes más volátiles pasan a la fase de vapor y a continuación, enfriar el vapor para recuperar dichos componentes en forma líquida por medio de la condensación (Chaparro; Cerro y Palma 2006).

## **CAPÍTULO III**

### **MARCO METODOLÓGICO**

#### **3.1. Tipo y diseño de la investigación**

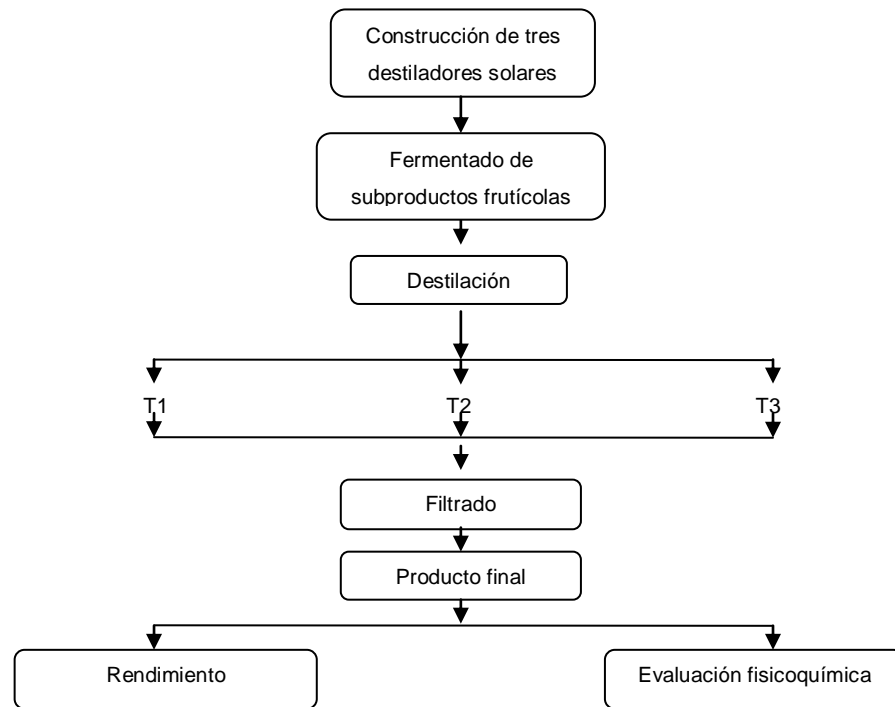
##### **3.1.1. Tipo de investigación**

El tipo de investigación utilizado fue explicativa.

##### **3.1.2. Diseño de la investigación**

Se utilizó un diseño experimental con tres tratamientos y tres repeticiones, obteniéndose un total de nueve muestras.

En la figura 2 se muestra las principales etapas para el desarrollo del experimento de la forma cómo se ha realizado el trabajo de investigación en el proceso de destilación.



**Figura 2.** Principales etapas en el desarrollo del experimento.

**Fuente:** Elaboración propia.

### 3.2. Población y muestra

La muestra de subproductos frutícolas o descarte de sandía e higos que se utilizó fue de Magollo – Tacna y se consideró un total de 200 kg.

### 3.3. Operacionalización de variables

En la tabla 2 se muestra la operacionalización de las variables.

**Tabla 2.**

**Operacionalización de variables.**

<b>Hipótesis específicas</b>	<b>Objetivos específicos</b>	<b>Tipo de variable</b>	<b>Indicadores</b>	<b>Métodos</b>	<b>Pruebas estadísticas</b>
Si es posible construir tres sistemas de destilación solar.	Construir tres sistemas de destilación solar para obtener bioetanol.	<b>Independiente:</b> -Destiladores solares. <b>Dependiente:</b> -Temperatura máxima en el eje focal.	Tres destiladores solares 350 a 800 °C.	Realizar mediante una termocupla y multitéster para medir la temperatura.	Diseño experimental con tres tratamientos.
Si se compara tres sistemas de destilación solar, entonces se determinará cuál de ellos es el más eficiente en el tiempo para la obtención de mayores volúmenes de bioetanol.	Evaluar el tiempo de destilación solar y volumen obtenido de bioetanol a partir de un fermentado de subproductos frutícolas.	<b>Independiente:</b> <b>Hora del día de la destilación solar:</b> -Destilador 1 (cocina ck 002, alambique de cobre). -Destilador 2 (cocina solar ck 002, olla de aluminio). - Destilador solar 3 (cocina solar sk-12). <b>Dependiente:</b> - Tiempo  -Volumen	10:00 a 14:00 h.  40 a 150 min. 400 a 500 ml.	La destilación solar se realizó en días calurosos.  Se Realizó mediante un reloj con cronometro. Mediante una probeta.	Diseño experimental con tres tratamientos y tres repeticiones, se analizó con el coeficiente de determinación a un 95 % de confianza. Diseño experimental con tres tratamientos y tres repeticiones. Se analizó el tiempo con un análisis de varianza complementandose con la prueba de Tukey a un 95 % de confianza.
El análisis fisicoquímico del bioetanol obtenido permite determinar sus componentes .	Analizar fisicoquímicamente el producto final obtenido	<b>Independiente:</b> - Bioetanol <b>Dependiente:</b> <b>-Análisis fisicoquímico:</b> Grado alcohólico Extracto seco pH Acidez volátil Ésteres Furfural	10 a 15 %  40 a 70 G.L 0 a 0,8 g/L 3 a 5 100 a 1000 mg/100 ml AA 0,1 a 20 mg/L AA	El bioetanol se midió con una probeta. El grado alcohólico se determinó con un alcoholímetro, el extracto con una balanza analítica, el pH con un pH-metro, la acidez volátil y ésteres por cromatografía de gases y el furfural mediante espectrofotometría .	Diseño experimental con tres muestras y tres repeticiones. Las determinaciones fisicoquímicas se analizaron con un análisis de varianza complementado con la prueba de Tukey a un 95 y 99 % de confianza.

**Fuente:** Elaboración propia.

### **3.4. Técnicas e instrumentos para la recolección de datos**

#### **3.4.1. Técnicas para la recolección de datos**

Las técnicas o procedimiento para la recolección u obtención de datos se realizaron de acuerdo a los objetivos específicos trazados de la siguiente manera:

##### **Objetivo 1: Construir tres sistemas de destilación solar**

Se construyó tres sistemas de destilación solar, el primero con una cocina solar ck-002 semitubular y un alambique de cobre sin estañar de 5 L de capacidad, pintado de color negro mate; el segundo con una cocina solar ck-002 semitubular y una olla de aluminio de 5 L de capacidad, pintado de color negro mate con una tapa de vidrio inclinado y el tercero con una cocina solar sk-14 y un alambique de cobre sin estañar de 5 L de capacidad, pintado de color negro mate; los tres sistemas de destilación solar se adaptaron para obtener destilados durante un día soleado controlando la temperatura con un termómetro y tiempo de calentamiento con un cronómetro.

**Objetivo 2: Evaluar el tiempo de destilación solar y volumen obtenido de bioetanol a partir de un fermentado de subproductos frutícolas**

Se comparó el tiempo de destilado en los tres sistemas de destilación mediante un cronómetro, el volumen de destilado (rendimiento) se determinó con una probeta y los análisis fisicoquímicos que se realizaron al fermentado fueron:

- **Determinación del grado alcohólico**

Se determinó de acuerdo a la NTP 211.005: 1967 (Chaparro, 1984a).

- **Determinación azúcares reductores**

Se realizó mediante el uso del espectrofotómetro (Graham, 1996).

- **Determinación de la acidez total**

Se determinó según el método oficial de la A.O.A.C. (Peynaud, 1984).

- **Determinación de la acidez volátil**

Según el método de Duclaux modificado.

- **Determinación del pH**

Según el método Oficial de la A.O.A.C. (Noguera 1974).

- **Determinación del volumen**

Se realizó mediante una probeta de 500 ml de capacidad.

**Objetivo 3: Analizar fisicoquímicamente el producto final obtenido**

Al destilado se le realizó un análisis fisicoquímico de la siguiente manera:

- **Determinación del grado alcohólico**

Según el método de la NTP 319.229/2003.

Mediante un picnómetro y tablas de la NTP de destilados.

- **Determinación del extracto seco**

Método oficial A.O.A.C. 920.47. 2000.

Extracto de licores destilados.

El peso o medida a 20 °C, 25-100 ml de la porción de prueba, evaporar la sequedad en el baño de vapor, secar en 30 min a 100 °C, enfriar en el secador durante 30 min y pesar.

- **Determinación del pH**

Según el método del pH-metro.

- Calibrar debidamente el potenciómetro con las soluciones buffer, considerando la temperatura de la muestra correspondiente.
- Colocar la muestra en un vaso de vidrio y proceder a medir el pH, esperando durante un minuto hasta conseguir el equilibrio del potenciómetro. Leer el pH directamente de la pantalla del equipo.

- **Determinación de la acidez volátil y ésteres**

Según el método de la NTP 211.035: 2003.

BEBIDAS ALCOHÓLICA. Método de ensayo.

Determinación de metanol y de congéneres en bebidas alcohólicas y en alcohol etílico empleando en su elaboración, mediante cromatografía de gases.

- **Determinación de furfural**

Se determinó según el método por espectrofotometría de acuerdo a la NTP 210.025: 2003.

### **3.4.2. Instrumentos para la recolección de datos**

#### **3.4.2.1. Materiales y equipos**

##### **a. Materiales**

- Alcoholímetro, escala de 0 a 100 °G.L
- Bureta graduada de 100 ml
- Balón de 250 y 1000 ml
- Botellas de 500 ml
- Canastilla metálica
- Copas de cata de 50 ml
- Damajuanas de 5 L
- Desecador de vidrio
- Erlenmeyers, 50 y 100 ml
- Matraces aforados de 50 y 250 ml
- Picnómetro de 25 ml con termómetro
- Pipetas de 1 y 10 ml
- Probeta de vidrio de 25, 100 y 500 ml
- Refrigerante con reflujo
- Tablas de corrección de grado alcohólico a 20 °C
- Termómetro graduado, 0 a 35 °C y de 0 a 150 °C
- Refractómetro de 0 a 30 grados Brix
- Vasos de precipitado de 50 y 250 ml

- Baldes.

#### **b. Equipos**

- Laptop marca Toshiba
- Video filmadora marca JVC
- Balanza analítica digital de 0,0000 a 250,0000 g
- Cromatógrafo de gases (por inyección)
- Equipo de baño maría
- Espectrofotómetro U.V
- Estufa
- Potenciómetro de 0 a 14 pH
- Alambique de cobre de 5 L
- Cocinas solares
- Titulador de enrase automático.

#### **3.4.2.2. Reactivos**

- Alcohól etílico absoluto
- Furfural
- Agua destilada
- Hidróxido de sodio 0,1 y 0,01 N
- Solución de fenolftaleína al 1 %

### **3.5. Procesamiento y análisis de datos**

Se realizó por cada objetivo específico de la siguiente manera:

#### **Objetivo 1: Construir tres sistemas de destilación solar**

Se comparó los pesos, tipo de olla y temperatura máxima en el eje focal (promedio) de cada destilador solar para obtener bioetanol de un fermentado de subproductos frutícolas.

#### **Objetivo 2: Evaluar el tiempo de destilación solar y volumen obtenido de bioetanol a partir de un fermentado de subproductos frutícolas**

El análisis estadístico para el tiempo y volumen de bioetanol durante el proceso de destilación solar del fermentado de subproductos frutícolas se realizó mediante el coeficiente de determinación a un 95 % de confianza y para evaluar el tiempo de destilación solar final con volumen constante de bioetanol se realizó mediante el análisis de varianza y la prueba de contraste múltiple de Tukey a un 95 y 99 % de confianza.

#### **Objetivo 3: Analizar fisicoquímicamente el producto final obtenido**

Se utilizó la prueba estadística de análisis de varianza, se determinó la existencia de diferencias entre las tres muestras de destilados con sus

tres repeticiones y se complementó con la prueba de contraste múltiple de Tukey con un 95 y 99 % de confianza.

## **CAPÍTULO IV**

### **RESULTADOS**

#### **4.1. Construcción de tres sistemas de destilación solar**

En la figura 3 se presenta el destilador solar 1 (cocina solar ck-002 y alambique de cobre sin estaño) que tuvo un peso total de 12,60 kg; la altura del destilador fue de 0,97 m (del suelo al eje focal); el diámetro de la cocina solar fue de 1,50 m; el área de 1,767 m<sup>2</sup>; la temperatura máxima en el eje focal fue de 764 °C (15 al 19 de febrero del 2014); la olla de cobre tuvo una capacidad de 5 L; el serpentín es de cobre de 1 plg. con una dimensión desde la salida de la olla hasta la probeta de 1,95 m; el enfriador es de cobre de 1 plg. de diámetro de 6 espirales haciendo un total de 2,7 m; el alambique de cobre pintada de color negro tuvo un peso de 3,30 kg.

En la figura 4 se presenta el destilador solar 2 (cocina solar ck-002 y olla de aluminio) que tuvo un peso total de 11,40 kg; la altura del destilador fue de 0,97 m (del suelo al eje focal); el diámetro de la cocina solar de 1,50 m; el área de 1,767 m<sup>2</sup>; la temperatura máxima en el eje

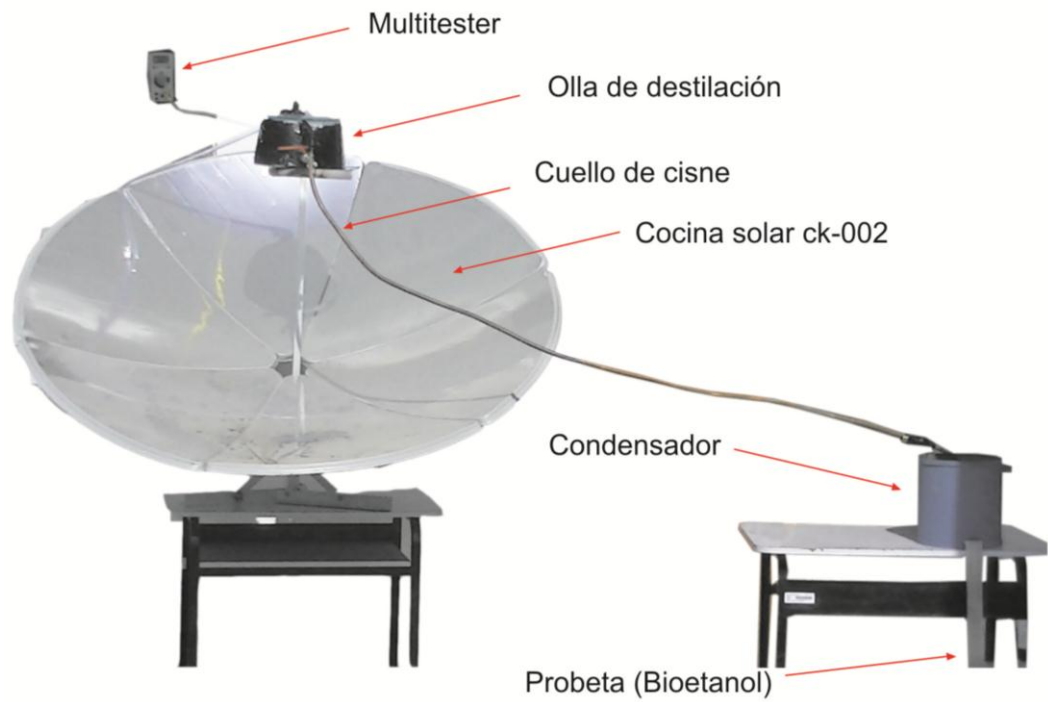
focal fue de 764 °C (15 al 19 de febrero del 2014); la olla de aluminio pintada de negro tuvo una capacidad de 5 L; el serpentín es de cobre de 1 plg. con una dimensión desde la salida de la olla hasta la probeta de 1,95 m; el enfriador es de cobre de 1 plg. de diámetro de 6 espirales haciendo un total de 2,7 m; la olla de aluminio pintada de color negro tuvo un peso de 2,10 kg.

La figura 5 presenta el destilador solar 3 (cocina solar sk-12 y alambique de cobre sin estaño) que tuvo un peso total de 40,80 kg; la altura del destilador fue de 1,10 m (del suelo al eje focal); el diámetro de la cocina solar de 1,50 m; el área de 1,767 m<sup>2</sup>; la temperatura máxima en el eje focal fue de 389 °C (15 al 9 de febrero del 2014); la olla de cobre tuvo una capacidad de 5 L; el serpentín es de cobre de 1 plg. con una dimensión desde la salida de la olla hasta la probeta de 1,90 m; el enfriador es de cobre de 1 plg. de diámetro de 6 espirales haciendo un total de 2,5 m; el alambique de cobre pintada de color negro tuvo un peso de 3,30 kg.



**Figura 3.** Componentes del destilador solar de fermentados ck-002 con olla de cobre sin estaño de 5 L de capacidad.

**Fuente:** Elaboración propia.



**Figura 4.** Componentes del destilador solar de fermentados ck-002 con olla de aluminio de 5 L de capacidad.

**Fuente:** Elaboración propia.



**Figura 5.** Componentes del destilador solar de fermentados sk-12 con olla de cobre sin estaño de 5 L de capacidad.

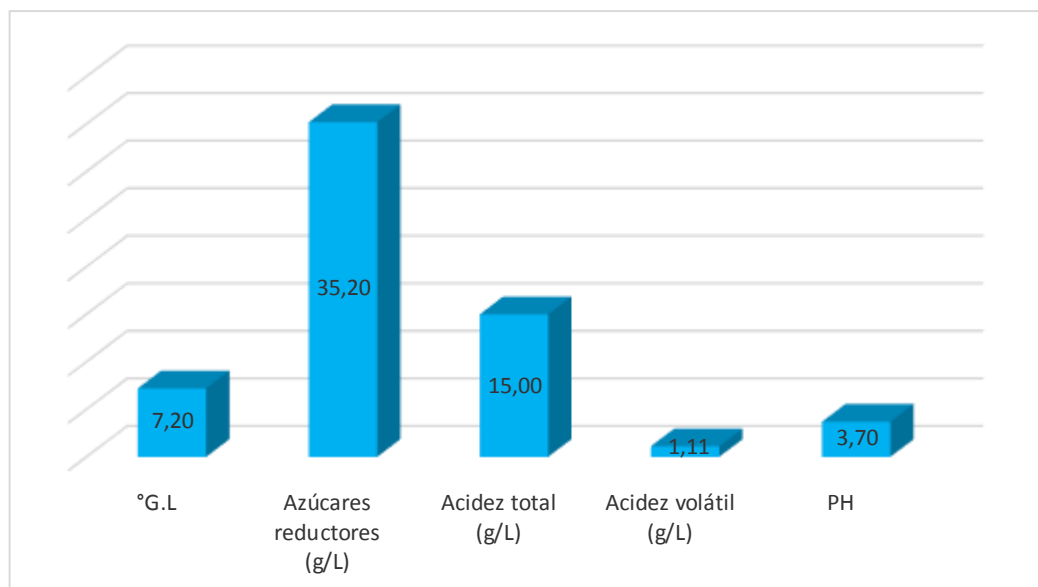
**Fuente:** Elaboración propia.

## **4.2. Evaluación del tiempo de destilación solar y volumen obtenido de bioetanol a partir de un fermentado de subproductos frutícolas**

### **4.2.1. Fermentado de subproductos frutícolas para la obtención de bioetanol**

Se fermentó 200 kg de sandía y 28 kg de higos (mosto inicial de 8,5 grados Baumé) y se obtuvo 78 L de vino base a destilar, los resultados del análisis fisicoquímico del fermentado a destilar fueron:

Grado alcohólico de 7,2 °G.L; azúcares reductores de 35,2 g/L; acidez total de 15 g/L; acidez volátil de 1,11 g/L y pH de 3,7 (ver figura 6).



**Figura 6.** Componentes del fermentado de subproductos frutícolas.

**Fuente:** Elaboración propia.

#### **4.2.2. Seguimiento del tiempo de destilación solar y volumen de bioetanol**

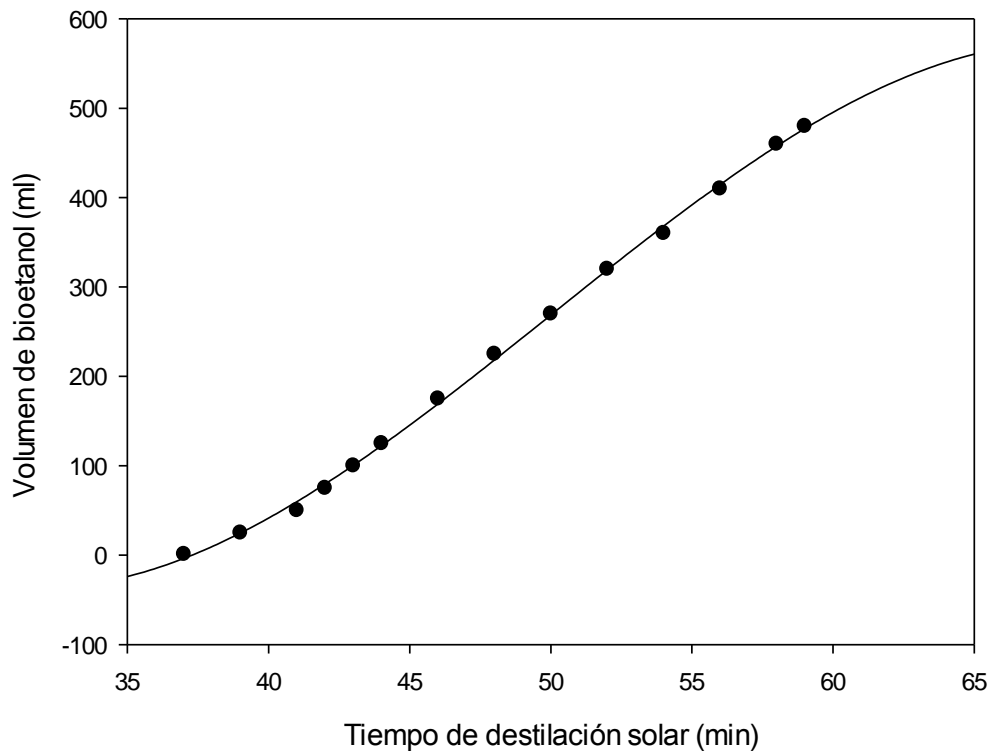
En la evaluación del tiempo de destilación solar se consideró a partir de la 10:00 h por la mayor irradiancia solar; los tiempos para destilar 4 L de vino del fermentado de sandía e higos en los tres destiladores estuvieron entre 59 a 125 min obteniéndose un volumen de 480 ml (12 %) de bioetanol con 43 °G.L en los tres casos.

En todos los procesos de destilación se consideró 4 L de vino de sandía e higos para la obtención de 480 ml de bioetanol. El destilador solar 2 obtuvo el mínimo tiempo de destilación, fue el más eficiente y se realizó con una cocina solar ck-002 y una olla de aluminio pintada de color negro mate con 49 min; en segundo lugar lo ocupó el destilador solar 1 diseñado con una cocina solar ck-002 y un alambique de cobre pintado de negro mate en un tiempo de 59 min y en tercer lugar el destilador solar 3 que tuvo una cocina solar sk-12 con un alambique de cobre pintado de color negro mate con un tiempo de 125 min.

El coeficiente de determinación para el destilador solar que ocupó el segundo lugar en eficiencia (cocina solar ck-002 y alambique de cobre) fue de  $R_{sqr}=0,9991$ ; el coeficiente ajustado  $Adj R_{sqr}=0,9988$  y el modelo matemático que más se ajustó fue una ecuación polinomial cúbica:

$$Y (\text{bioetanol en ml}) = 2\,221,2537 - 167,7785X + 3,8625X^2 - 0,0061X^3$$

En la figura 7 se muestra el volumen de bioetanol vs el tiempo de destilación solar con una cocina solar ck-002 y alambique de cobre.



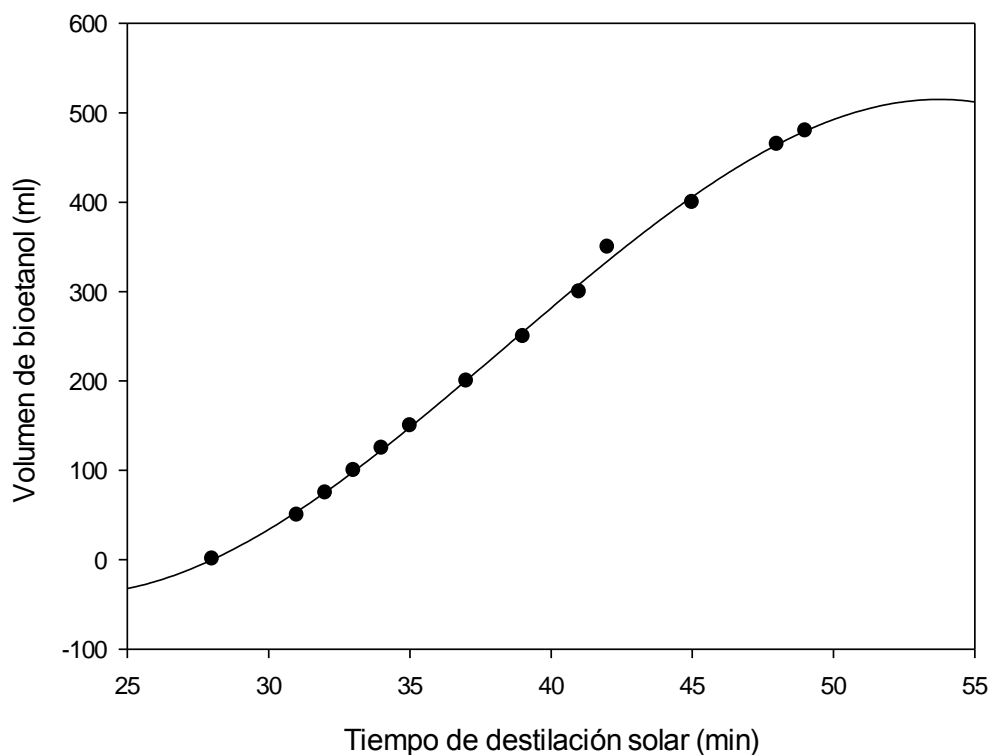
**Figura 7.** Volumen de bioetanol vs tiempo de destilación solar con una cocina solar ck-002 y alambique de cobre.

**Fuente:** Elaboración propia.

El coeficiente de determinación para el destilador más eficiente que ocupó el primer lugar (cocina solar ck-002 y olla de aluminio) fue de  $R_{sqr}=0,9987$ ; el coeficiente ajustado  $Adj\ R_{sqr}=0,9983$  y el modelo matemático que más se ajustó fue una ecuación polinomial cúbica:

$$Y (\text{bioetanol en ml}) = 1\,364,639 - 142,1487X + 4,4081X^2 - 0,0383X^3$$

En la figura 8 se muestra el volumen de bioetanol vs el tiempo de destilación solar con una cocina solar ck-002 y olla de aluminio.



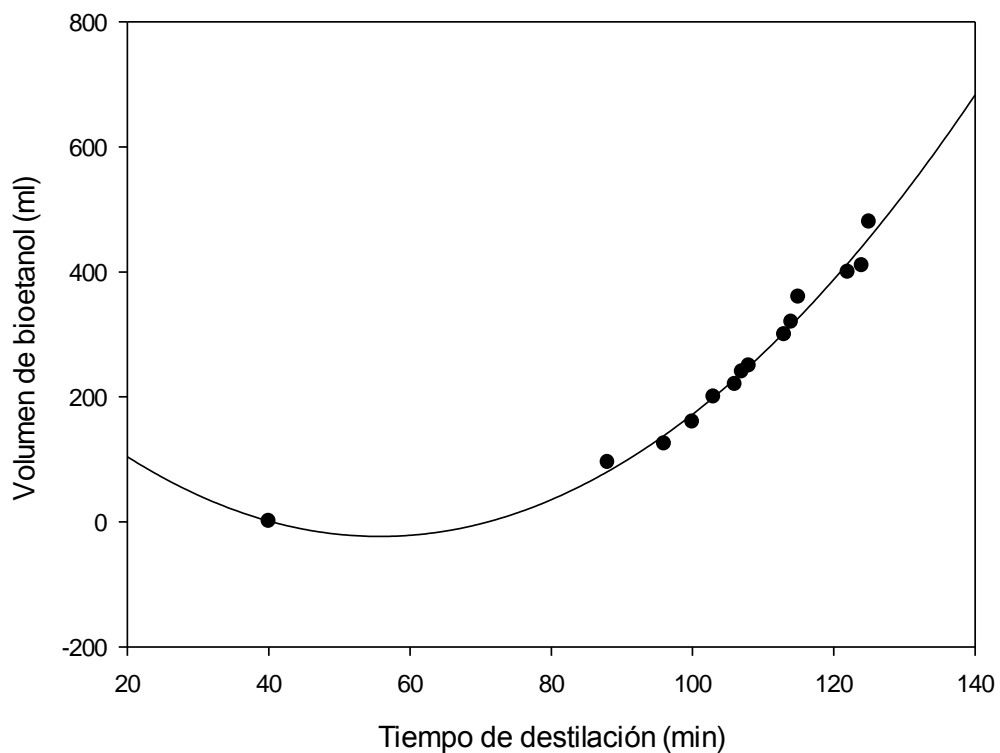
**Figura 8:** Volumen de bioetanol vs tiempo de destilación solar con una cocina solar ck-002 y olla de aluminio.

**Fuente:** Elaboración propia.

El coeficiente de determinación para el destilador que ocupó el tercer lugar (cocina solar sk-12 y alambique de cobre) fue de  $R_{sqr}=0,9848$ ; el coeficiente ajustado  $Adj\ R_{sqr}=0,9802$  y el modelo matemático que más se ajustó fue una ecuación polinomial cúbica:

$$Y \text{ (bioetanol en ml)} = 286,8663 - 11,1422X + 0,1002X^2 - 2,9929E-006X^3$$

En la figura 9 se muestra el volumen de bioetanol vs el tiempo de destilación solar con una cocina solar sk-12 y alambique de cobre.



**Figura 9.** Volumen de bioetanol vs tiempo de destilación solar con una cocina solar sk-12 y alambique de cobre.

**Fuente:** Elaboración propia.

### 4.2.3. Análisis de varianza y prueba de contraste múltiple de Tuckey del tiempo de destilación solar

En la tabla 3 se muestra el análisis de varianza del tiempo de destilación solar al volumen el cual indica que existe una alta diferencia significativa entre los tratamientos y con un coeficiente de variabilidad de 2,466 %.

**Tabla 3.**

Análisis de varianza del tiempo de destilación solar.

Origen	Suma de cuadrados tipo III	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Tratamientos	10 232,000	2	5 116,000	1 395,273	0,000
Error	22,000	6	3,667		
Total	10 254,000	8			

C.V = 2,466 %

**Fuente:** Elaboración propia.

La prueba de rango múltiple de Tuckey ( $p=0,05$ ) que se presenta en la tabla 4 indica que el tratamiento T2 (cocina solar ck-002 y alambique de aluminio) fue el más eficiente para destilar 4 L de vino de sandía e higos obteniendo 480 ml de bioetanol en un promedio de tiempo de 49 min y se diferenció con respecto a las demás muestras; el tratamiento T1 (cocina solar ck-002 y alambique de cobre) utilizó un tiempo de 59 min y

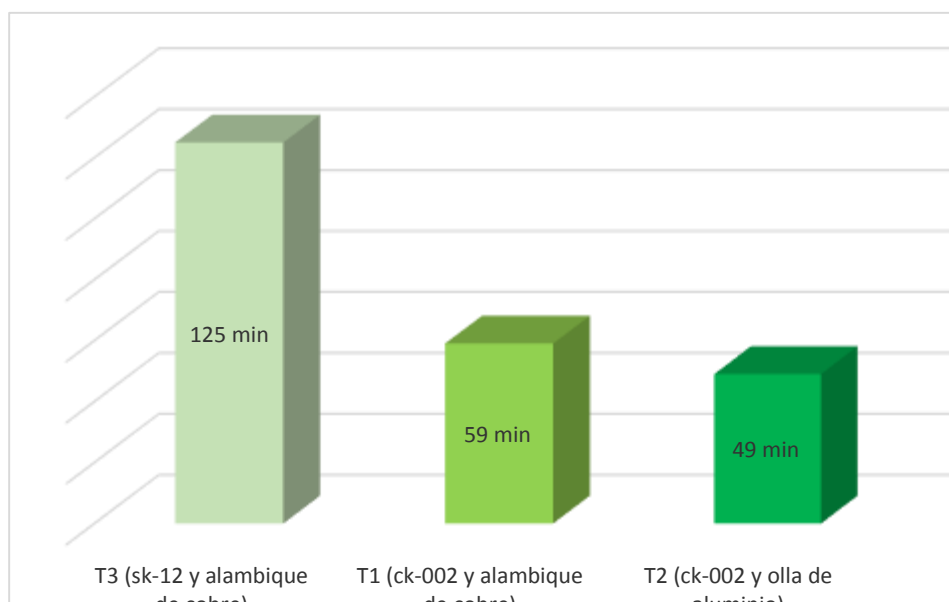
finalmente, el tratamiento T3 (cocina solar sk-12 y alambique de cobre) con un tiempo de 125 min. El tiempo de destilación solar por tratamiento se muestra en la figura 10.

**Tabla 4.**

Prueba de rango múltiple de Tuckey ( $p=0,05$ ): Tiempo de destilación solar (min).

Orden	Tratamiento	Promedio	Significancia
1	T3 (sk-12 y alambique de cobre)	125,00	a
2	T1 (ck-002 y alambique de cobre)	59,00	b
3	T2 (ck-002 y olla de aluminio)	49,00	c

**Fuente:** Elaboración propia.



**Figura 10.** Tiempo de destilación solar por tratamiento.

**Fuente:** Elaboración propia.

### 4.3. Análisis fisicoquímico del producto final obtenido

#### 4.3.1. Extracto seco

En la tabla 5 se muestra el análisis de varianza del contenido de extracto seco en las muestras de bioetanol, el cual indica que existe una alta diferencia significativa entre los tratamientos, con un coeficiente de variabilidad de 0,001 %.

**Tabla 5.**

Análisis de varianza del contenido de extracto seco (mg/L).

Origen	Suma de cuadrados tipo III	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Tratamientos	0,047	2	0,024	51,683	0,000
Error	0,003	6	0,000		
Total	0,050	8			

C.V = 0,001 %

**Fuente:** Elaboración propia.

La prueba de rango múltiple de Tuckey ( $p=0,05$ ) que se presenta en la tabla 6 referido al contenido promedio de extracto seco en las muestras de bioetanol, indica que el tratamiento T2 (cocina solar ck-002 y olla de aluminio) registró el mayor contenido de extracto seco con 0,7300 mg/L no se diferenció con respecto al tratamiento T1 (cocina solar ck-002 y alambique de cobre) que tuvo 0,7233 mg/L y finalmente, el tratamiento T3

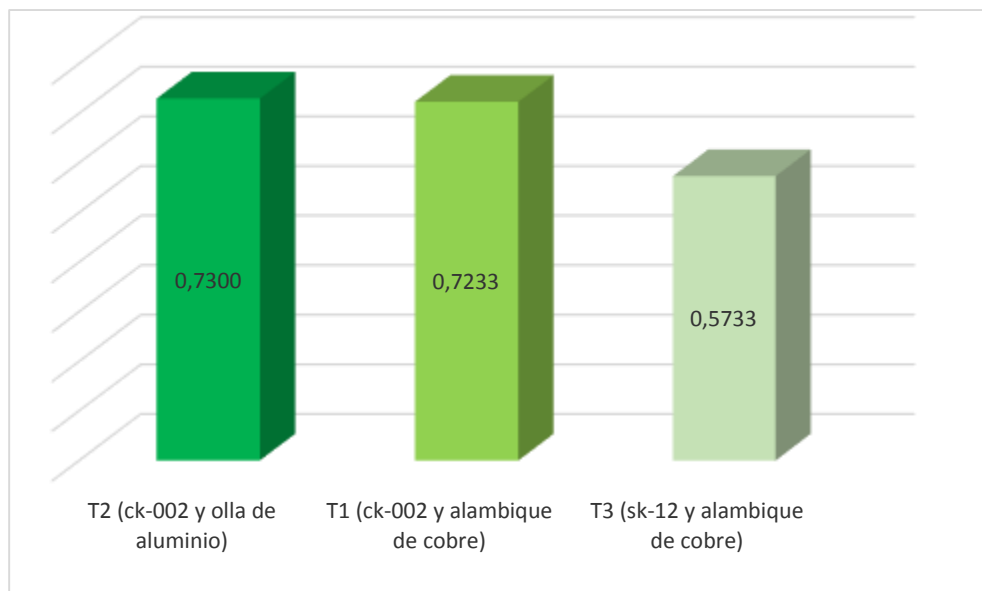
(cocina solar sk-12 y alambique de cobre) registró 0,5733 mg/L de extracto seco. El resultado del contenido de extracto seco (mg/L) de las tres muestras de bioetanol se presenta en la figura 11.

**Tabla 6.**

Prueba de rango múltiple de Tuckey ( $p=0,05$ ): Extracto seco (mg/L).

Orden	Tratamiento	Promedio	Significancia
1	T2 (ck-002 y olla de aluminio)	0,7300	a
2	T1 (ck-002 y alambique de cobre)	0,7233	a
3	T3 (sk-12 y alambique de cobre)	0,5733	b

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 11.** Contenido de extracto seco (mg/L) de las tres muestras de bioetanol.

Fuente: Elaboración propia.

### 4.3.2. pH

En la tabla 7 se muestra el análisis de varianza del contenido del pH en las muestras de bioetanol, el cual indica que no existe diferencia significativa entre los tratamientos, con un coeficiente de variabilidad de 2,429 %.

**Tabla 7.**

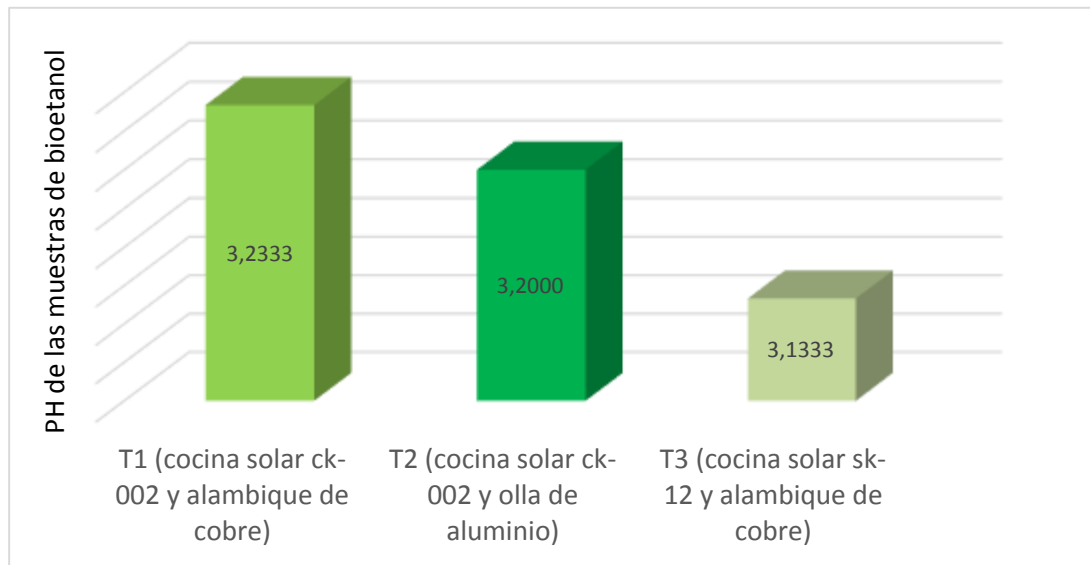
Análisis de varianza del pH.

Origen	Suma de cuadrados tipo III	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Tratamientos	0,016	2	0,008	1,400	0,317
Error	0,033	6	0,006		
Total	0,049	8			

C.V = 2,429 %

**Fuente:** Elaboración propia.

La figura 12 referido al pH de las muestras de bioetanol obtenidas mediante tres destiladores solares, indica que el tratamiento T1 (cocina solar ck-002 y alambique de cobre) registró 3,2333 de pH; seguido del tratamiento T2 (cocina solar ck-002 y olla de aluminio) que tuvo 3,2000 y finalmente, el tratamiento T3 (cocina solar sk-12 y alambique de cobre) registró 3,1333 de pH.



**Figura 12.** pH de las tres muestras de bioetanol.

**Fuente:** Elaboración propia.

#### 4.3.3. Ésteres totales

En la tabla 8 se muestra el análisis de varianza del contenido de ésteres en las muestras de bioetanol, el cual indica que existe una alta diferencia significativa entre los tratamientos, con un coeficiente de variabilidad de 1,188 %.

**Tabla 8.**

Análisis de varianza del contenido de ésteres.

Origen	Suma de cuadrados tipo III	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Tratamientos	0,158	2	0,079	14,850	0,005
Error	0,032	6	0,005		
Total	0,190	8			

C.V = 1,188 %

**Fuente:** Elaboración propia.

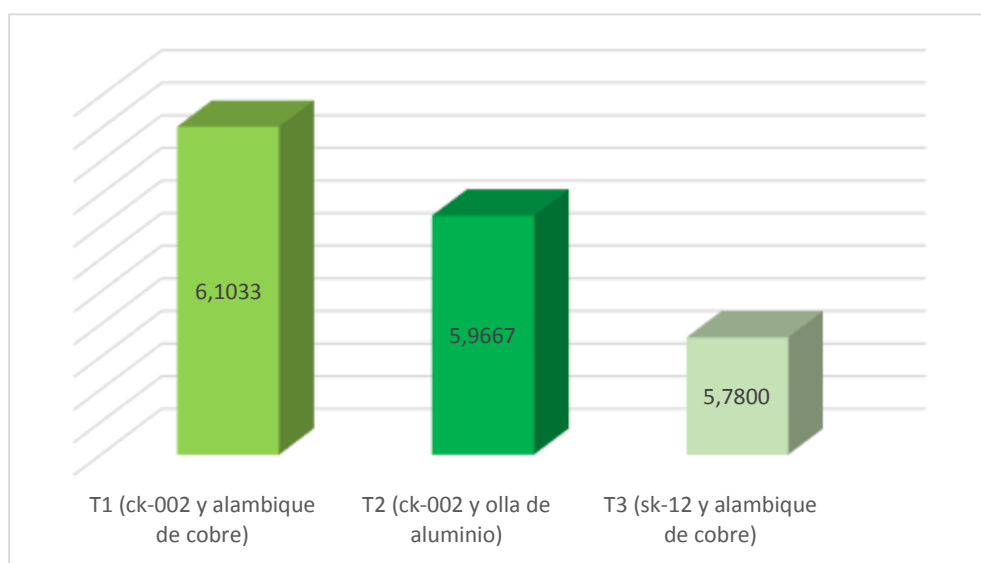
La prueba de rango múltiple de Tuckey ( $p=0,05$ ) que se presenta en la tabla 9 referido al contenido promedio de ésteres en las muestras de bioetanol, indica que el tratamiento T1 (cocina solar ck-002 y alambique de cobre) obtuvo el mayor contenido de ésteres con 6,1033 mg/100 ml AA y no se diferenció del tratamiento T2 (cocina solar ck-002 y olla de aluminio) que tuvo 5,9667 ml/100 ml AA y finalmente, el tratamiento T3 (cocina solar sk-12 y alambique de cobre) con 5,7800 mg/100 ml AA. En la figura 13 se presenta el contenido de ésteres (mg/100 ml AA) de las tres muestras de bioetanol.

**Tabla 9.**

Prueba de rango múltiple de Tuckey ( $p=0,05$ ): Ésteres (mg/100 ml AA).

Orden	Tratamiento	Promedio	Significancia
1	T1 (ck-002 y alambique de cobre)	6,1033	a
2	T2 (ck-002 y olla de aluminio)	5,9667	a
3	T3 (sk-12 y alambique de cobre)	5,7800	b

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 13.** Contenido de ésteres (mg/100 ml AA) de las tres muestras de bioetanol.

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.3.4. Acidez volátil (acética)

En la tabla 10 se muestra el análisis de varianza del contenido de acidez volátil (acidez acética) en las muestras de bioetanol, el cual indica que existe diferencia significativa entre los tratamientos, con un coeficiente de variabilidad de 0,199 %.

**Tabla 10.**

Análisis de varianza del contenido de acidez volátil (ácido acético).

Origen	Suma de cuadrados tipo III	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Tratamientos	21,514	2	10,757	5,383	0,046
Error	11,990	6	1,998		
Total	33,504	8			

C.V = 0,199 %

**Fuente:** Elaboración propia.

La prueba de rango múltiple de Tuckey ( $p=0,05$ ) que se presenta en la tabla 11 referido al contenido promedio de acidez volátil (ácido acético) en las muestras de bioetanol indica que el tratamiento T2 (cocina solar ck-002 y olla de aluminio) registró el mayor contenido de acidez volátil con 710,8517 mg/100 ml AA y se diferenció con respecto a las demás muestras; del tratamiento T2 (cocina solar ck-002 y alambique de cobre) tuvo 707,8517 mg/100 ml AA y finalmente, el tratamiento T3 (cocina solar

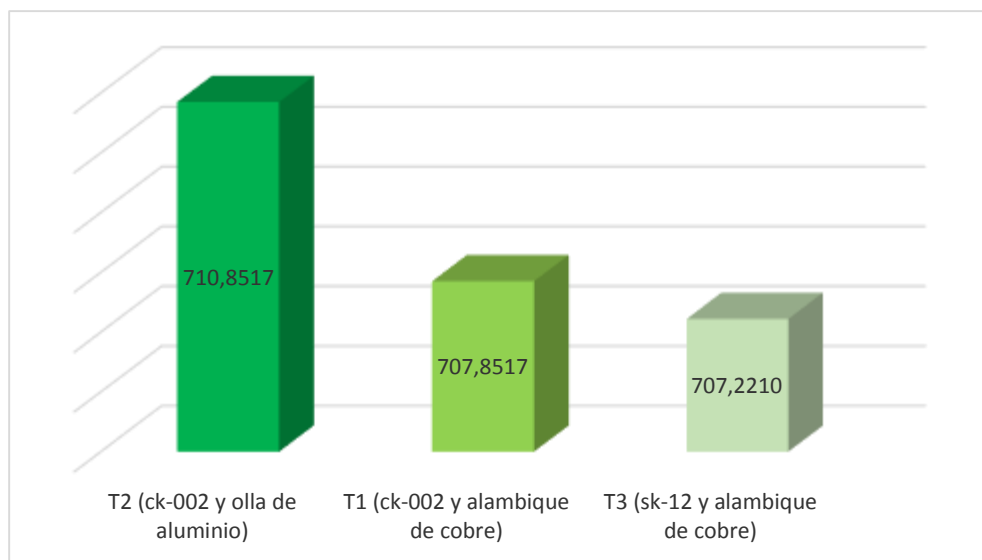
sk-12 y alambique de cobre) con 707,2210 mg/100 ml AA. En la figura 14 se presenta el contenido de ácido acético (mg/100 ml AA) de las tres muestras de bioetanol.

**Tabla 11.**

Prueba de rango múltiple de Tuckey ( $p=0,05$ ): Ácido acético (mg/100 ml AA).

<b>Orden</b>	<b>Tratamiento</b>	<b>Promedio</b>	<b>Significancia</b>
1	T2 (ck-002 y olla de aluminio)	710,8517	a
2	T1 (ck-002 y alambique de cobre)	707,8517	b
3	T3 (sk-12 y alambique de cobre)	707,2210	b

**Fuente:** Elaboración propia.



**Figura 14.** Contenido de ácido acético (mg/100 ml AA) de las tres muestras de bioetanol.

**Fuente:** Elaboración propia.

#### 4.3.5. Furfural

En la tabla 12 se muestra el análisis de varianza del contenido de furfural en las muestras de bioetanol, el cual indica que existe diferencia significativa entre los tratamientos, con un coeficiente de variabilidad de 1,132 %.

**Tabla 12.**

Análisis de varianza del contenido de furfural.

Origen	Suma de cuadrados tipo III	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Tratamientos	67,026	2	33,513	1674,029	0,000
Error	0,120	6	0,020		
Total	67,146	8			

C.V = 1,132 %

**Fuente:** Elaboración propia.

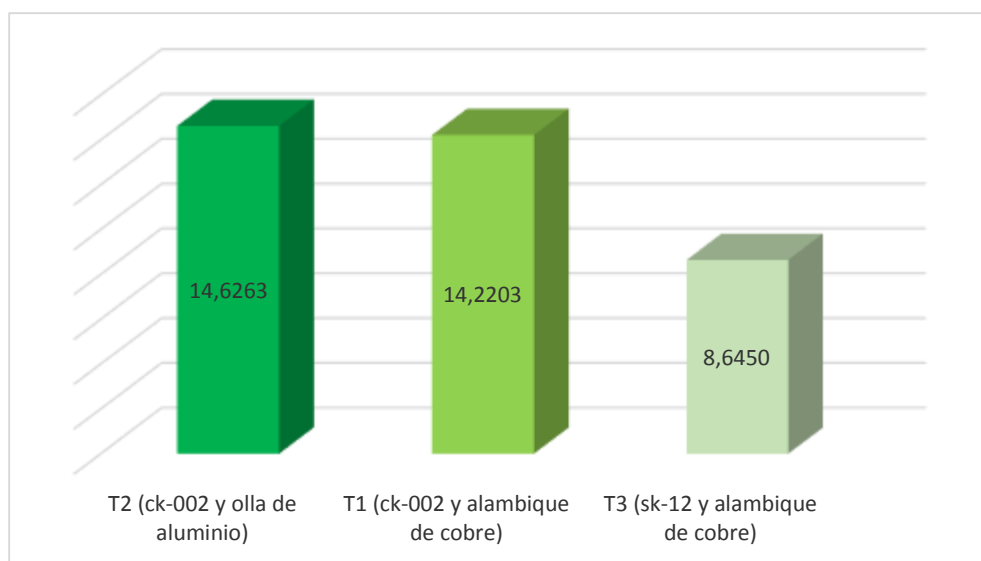
La prueba de rango múltiple de Tuckey ( $p=0,05$ ) que se presenta en la tabla 13 referido al contenido promedio de furfural en las muestras de bioetanol, indica que el tratamiento T2 (cocina solar ck-002 y olla de aluminio) registró el mayor contenido de furfural con 14,6263 mg/L AA y se diferenció con respecto a las demás muestras; del tratamiento T2 (cocina solar ck-002 y alambique de cobre) tuvo 14,2203 mg/L AA y finalmente el tratamiento T3 (cocina solar sk-12 y alambique de cobre) con 8,6450 mg/L AA. En la figura 15 se presenta el contenido de furfural (mg/L AA) de las tres muestras de bioetanol.

**Tabla 13.**

Prueba de rango múltiple de Tuckey ( $p=0,05$ ): Furfural (mg/L AA).

Orden	Tratamiento	Promedio	Significancia
1	T2 (ck-002 y olla de aluminio)	14,6263	a
2	T1 (ck-002 y alambique de cobre)	14,2203	b
3	T3 (sk-12 y alambique de cobre)	8,6450	c

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 15.** Contenido de furfural (mg/L AA) de las tres muestras de bioetanol.

Fuente: Elaboración propia.

## **CAPÍTULO V**

### **DISCUSIÓN**

#### **5.1. Construcción de tres sistemas de destilación solar**

En general los tres sistemas de destilación solar tuvieron buenos resultados al utilizar una energía renovable que no produce dióxido de carbono coincidiendo con Balcázar (2008) quien indicó que el sol es una fuente de energía natural, limpia e inagotable, Fuentes y Roth (1997) utilizaron una torre de destilación solar al vacío para obtener agua destilada, del mismo modo Zizzias et al., (2010) y Chinappi *et al.*, (2007) emplearon destiladores solares de agua y Srinivasan (1993) acopló a una planta de destilación a escala piloto con una capacidad de 1,8 L/h de 95 % v/v de etanol.

Los tres destiladores solares tuvieron cocinas solares semi tubulares, la cocina solar que más temperatura tuvo fue la ck-002 con una temperatura máxima en el eje focal de 764 °C y la que menos temperatura tuvo fue la cocina solar sk-12 con 389 °C en su eje focal, estas diferencias se debieron por el tipo de material reflectante, los

primeros utilizaron papel aluminio de lata reflectancia mientras que el tercer destilador tuvo aluminio anodizado. Los tres destiladores solares fueron diferentes al diseñado por Yabroudi (2011) quien reportó un destilador solar tubular y Balcázar (2008) con su prototipo de destilador solar para obtener bioetanol, que era con un manto de plástico; del mismo modo diferentes a lo reportado por Huezco y Morán (2012) quienes dieron a conocer cinco tipos de destiladores solares: Destilador solar de una vertiente DS1, destilador solar de dos vertientes o tipo caseta DS2, destilador solar de invernadero DS3, destilador solar de cascada DS4 y destilador solar esférico de barredera DS5.

## **5.2. Evaluación del tiempo de destilación solar y volumen obtenido de bioetanol a partir de un fermentado de subproductos frutícolas**

Se fermentó 200 kg de sandía y 28 kg de higos que tuvieron inicialmente 8,55 grados Baumé (13,8 grados Brix) resultado inferior a lo indicado por Sánchez (2010) quien reportó 13,34 grados Baumé (24,2 grados Brix) en un mosto de cachaza de caña de azúcar.

Del fermentado de sandía e higos se obtuvo 78 L y tuvo los siguientes resultados:

Grado alcohólico de 7,2 °G.L, resultado que fue superior al reportado por Aguilar y Hernández (2008) quienes fermentaron sandía, naranja y papaya y tuvieron resultados en alcohol de 4,8; 6,0 y 6,5 % v/v respectivamente; los resultados del presente trabajo de investigación referido en alcohol se encuentran dentro de los valores reportados por Ferreyra et al., (2009) quienes fermentaron naranja a diferentes temperaturas obteniendo grados alcohólicos de 6 a 8,5 g/100 ml (60 a 85 g/L), pero diferentes al reportado por Rocha et al., (2007) quienes determinaron en un fermentado de la pulpa de banano en promedio de alcohol de 8,95 % v/v y con contenido de azúcares inferiores de 5 g/L.

El contenido de azúcares reductores fue de 35,2 g/L, este resultado fue superior a lo reportado por Rocha et al., (2007) quienes determinaron en un fermentado de la pulpa de banano con promedio de contenido de azúcares inferiores de 5 g/L.

La acidez total del fermentado de subproductos frutícolas de sandía e higos fue 15 g/L el cual tiene una relación directamente proporcional con la acidez volátil, la presencia del contenido de acidez volátil o acética elevada de 1,11 g/L, este aumento se debió probablemente por la presencia de bacterias acéticas al haber utilizado sandías poco

malogradas donde ya se había iniciado la fermentación y porque no se adicionó metabisulfito de potasio como pasteurizador.

El pH del fermentado fue de 3,7 resultado que se asemeja a lo reportado por Suescum (2005) quien fermentó durante seis días la opundia a temperaturas entre 15 a 25 °C obteniendo un pH de 3,9.

El seguimiento del tiempo de destilación solar y volumen de bioetanol se realizó de la siguiente manera:

En la evaluación del tiempo de destilación solar se consideró a partir de la 10:00 h por la mayor irradiancia solar; los tiempos para destilar 4 L de vino del fermentado de sandía e higos en los tres destiladores estuvieron entre 59 a 125 min. obteniéndose un volumen de 480 ml (12 %) de bioetanol con 43 °G.L en los tres casos; los resultados se asemejan a lo indicado por Espin (2008) quien obtuvo un fermentado de manzana y lo destiló obteniendo un grado alcohólico de 42,6 °G.L con un rendimiento de 12 %, pero son diferentes a lo reportado por Chaparro (2005a) quien obtuvo 31 % de rendimiento en pisco puro de uva Italia con 41 °G.L en un destilador solar entre las 11:01 a 14:00 h y con un tiempo de 168 min; Rivera (1999) obtuvo un 23 % de rendimiento en un cuerpo

de pisco con 45 °G.L destilado con energía a petróleo; el tiempo de destilación solar del presente trabajo de investigación se asemeja al destilador solar que utilizó Balcázar (2008) quien obtuvo bioetanol en 55 min a partir de un vino de mango de 300 ml, de volumen 82,2 ml ( $17,00 \pm 0,03$  °G.L) con un rendimiento de 26,7 %, los tiempos de destilación solar varían de acuerdo al volumen de muestra de vino base en la olla y destilador solar, es decir, a menor volumen menor tiempo de destilación teniendo una relación directamente proporcional.

### **5.3. Análisis fisicoquímico del producto final obtenido**

El grado alcohólico en las muestras de bioetanol fue de 43 °G.L.

El contenido de extracto seco en las muestras de bioetanol estuvieron entre 0,5733 a 0,7300 mg/L, los cuales tuvieron una elevada diferencia significativa entre los tratamientos con un 99 % de confianza, estas diferencias se debieron por la presencia de trazas de cobre en los destilados con alambique de cobre y probablemente por la presencia de aluminio en el bioetanol obtenido en la olla de aluminio.

El pH en las muestras de bioetanol estuvieron entre 3,1333 (cocina solar sk-12 baja temperatura en el eje focal de 389 °C) a 3,2333 (cocina

solar ck-002 alta temperatura en el eje focal 764 °C) estas variaciones se debieron probablemente por efecto de las borras, temperatura y tiempo de destilación solar coincidiendo con Valera y Victorino (2006) quienes indicaron que si se quema levadura en un tubo de ensayo, éste libera amoníaco y agua en soluciones acuosas, el amoníaco desprotona una pequeña fracción del agua para dar iones de amonio e hidróxido, lo cual aumenta ligeramente el pH del agua; a mayor contenido de borras del vino base a destilar (levaduras muertas) y temperatura de la cocina solar mayor contenido de pH.

El contenido de ésteres totales en las muestras de bioetanol mostraron una alta diferencia significativa entre los tratamientos y los valores estuvieron entre 5,7800 a 6,1033 mg/100 ml AA, estas diferencias se debieron por la elevada temperatura y contenido de borras, los ésteres se forman por reacción bioquímica de los alcoholes, por reacción de un ácido graso y etanol (proceso de esterificación) o por biosíntesis de lípidos, esto ocurre durante la destilación; según Rodríguez et al., (2003) determinaron que el hecho de aumentar el porcentaje de fangos en el vino a destilar, incrementa la producción de ésteres, Linares et al., (2006) indicaron que la acidez volátil en el pisco puro de uva Quebranta tiene una relación casi directa con el contenido de ésteres; la investigación

coincide con Hatta (2009) quien indica que durante la destilación por efecto del calor hay lisis de levaduras (rompimiento de sus membranas celulares) liberando los ácidos grasos y éste reacciona con el etanol produciéndose ésteres, aumentando su contenido en el pisco.

El contenido de la acidez volátil (acidez acética) en las muestras de bioetanol mostraron una diferencia significativa entre los tratamientos, los cuales tuvieron de 707,2210 a 710,8517 mg/100 ml AA de acidez volátil, este elevado contenido se debió porque un porcentaje de las muestras de sandía ya venían fermentando y es probable que se encuentre bacterias acéticas y por el método de destilación coincidiendo con Torres y Alférez (2003); y Hatta (2009) quien indicó que la acidez acética se obtiene en mayor cantidad al final del proceso de destilación del mosto fermentado de uva Italia.

El contenido de furfural en las muestras de bioetanol mostraron que sí existe diferencia significativa entre los tratamientos los cuales estuvieron entre 8,6450 a 14,6363 mg/100 ml AA, los mayores contenidos se dieron con la cocina solar ck-002 y fue por la elevada temperatura en la parte de abajo de la olla y por los azúcares que quedaba en el vino base coincidiendo con Torres y Alférez (2003) quienes indicaron que el furfural

también se forma durante la destilación por la influencia del calor sobre ciertas pentosas del mismo modo lo indica Concha (2003) la formación del furfural tiende a darse en largas destilaciones, concentraciones elevadas de azúcares en el mosto y Chávez et al., (2003) ratifican indicando que el contenido de sólidos de fermentación del mosto en la destilación, sí influyen en el contenido final de furfural en el pisco.

## CONCLUSIONES

Primera:

En los tres sistemas de destilación solar se obtuvo bioetanol a partir de un fermentado de subproductos frutícolas en Tacna, el tiempo de destilación y los componentes fisicoquímicos de las muestras de bioetanol se vieron influenciados por efecto de la temperatura en el eje focal y diseño del recipiente donde se destiló.

Segunda:

Se construyó tres sistemas de destilación con las siguientes características: Cocina solar ck-002 y alambique de cobre pintada de negro (T1), peso total 12,60 kg, temperatura máxima en el eje focal 764 °C; cocina solar ck-002 y olla de aluminio pintada de negro (T2), peso total 11,40 kg, temperatura máxima en el eje focal 764 °C; cocina solar sk-12 y alambique de cobre pintada de negro (T3), peso total 40,80 kg, temperatura máxima en el eje focal 389 °C.

Tercera:

Se destiló 4 L de vino base fermentado de subproductos frutícolas (sandía e higos) y se obtuvo 480 ml (12 %) en cada sistema de destilación solar, resultando el más eficiente en el tiempo con un 95 % de confianza el destilador con una cocina solar ck-002 y olla de aluminio con 49 min; en segundo lugar el destilador con una cocina solar ck-002 y alambique de cobre con 59 min y en tercer lugar el destilador con una cocina solar sk-12 y alambique de cobre con 125 min.

Cuarta:

Las muestras de bioetanol tuvieron los siguientes componentes: Extracto seco entre 0,5733 a 0,7300 g/L; pH de 3,1333 a 3,2333; ésteres totales entre 5,7800 a 6,1033 mg/100 ml AA; acidez volátil de 707,2210 a 710,8517 mg/100 ml AA y furfural de 8,6450 a 14,6263 mg/L AA. Las variaciones de los componentes se dieron por la energía que concentra cada cocina solar en su eje focal y por el diseño de la olla de destilación.

## **RECOMENDACIONES**

Primera:

Realizar estudios de evaluación de transferencia de calor en destiladores solares al vacío para procesos de destilación de agua de mar y su uso en la agricultura.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aguilar Morales, Alfonso Omar y Hernández Henríquez David Ricardo.

(2006). Elaboración a nivel de laboratorio de vino a partir de fruta: manzana, naranja, papaya, pera y sandía. Tesis para optar el título de Ingeniero Químico. San Salvador. Universidad Centroamericana “José Simón Cañas”.

Balcázar Suárez, Yermy Esther. (2008). Desarrollo de un prototipo de

destilador solar para obtener bioetanol a partir de vino de mango (*Mangifera indica L.*). Tesis para optar el título de Ingeniera en Agroindustria Alimentaria en el Grado Académico de Licenciatura. Honduras. Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano. Honduras.

Chambilla Palomino, Raúl. (2005). “Propuesta para la selección de

variedades de uva (*Vitis vinífera L.*) y determinación de sus proporciones en la elaboración de piscos acholados tacneños”. Tacna. Tesis para obtener el título de Ingeniero en Industrias Alimentarias. UNJBG.

Chaparro M. E. (2005a). Empleo de la energía solar en la operación de destilado para la obtención de pisco puro Italia. Tacna. Tesis para obtener el Título de Ingeniero en Industrias Alimentarias UNJBG.

Chaparro Montoya, Efren; Cerro Ruiz, Samuel y Palma, Juan Carlos. (2006). Utilización de la energía solar para la obtención de pisco. VI congreso de pisco. Arequipa-Perú.

Chavez Alvarez, A. *et al.* (2003). II Congreso Nacional del Pisco, “Efecto de la presencia de sólidos residuales durante la destilación de caldos, sobre el contenido de furfural en pisco quebranta y torontel”. Tacna-Perú.

Chinappi Ciccolella, I., Jerez Carrizo, A., y Rosales Cirinos, J. (2007). Destilador de agua solar: alternativa para potabilizar agua en zonas rurales y determinación de costos. Academia Vol. VI (11): Pág. 70-76. Trujillo-Perú.

Concha Pereyra, E. (2003). II Congreso Nacional del Pisco, “Caracterización del pisco mosto verde quebranta, centro de formación Agrícola de Tacna (CEFAT)”. Tacna-Perú.

Espin Valladares, R. (2008). Producción y destilación de mosto de manzana (variedad santa lucia) para la obtención de calvados. Tesis de Ingeniero Agroindustrial. Ecuador. Escuela profesional de Ingeniería Agroindustrial, Facultad de Ingeniería en Ciencias Agropecuaria y Ambientales. Universidad Técnica del Norte.

Ferreira, María M.; Schwab, María del C.; Gerard, Liliana M.; Zapata, Luz M.; Davies, Cristina V. y Hours, Roque A. (2009). Fermentación alcohólica de jugo de naranja con *S. cerevisiae*. Ciencia, Docencia y Tecnología, Vol. XX, No. 39, Pág. 143-158. Universidad Nacional de Entre Ríos. Argentina

Fuentes, Ricardo y Roth, Pedro. (1997). Teoría de la destilación solar en vacío, Vol. 4, Pág. 49-56, disponible en <http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/pdf/114/11400407.pdf>

Graham Solomons, T. (1996). Química orgánica. Editorial Limusa. S.A. México.

Huezo Bautista, Francisco René y Morán Urrutia, Jazmín Idalia. (2012). Diseño, construcción y validación de un destilador solar para uso

en los laboratorios de la planta piloto de la escuela de Ingeniería Química. Tesis para optar al título de Ingeniero Químico. Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de El Salvador.

Hatta Sakoda, B. (2004). “Influencia de la fermentación con orujos en los componentes volátiles del pisco de uva Italia (*Vitis vinífera* L. var. Italia)”. Lima. Tesis de Maestría. Escuela de Postgrado UNALM.

Hatta Sakoda, B. (2009). Curso Enología. Escuela de Postgrado UNJBG. Tacna-Perú.

Lema Zarate, P. (2002). “Evaluación de la calidad de vinos tintos secos elaborados y embotellados en la ciudad de Tacna”. Tacna. Tesis para obtener el Título de Ingeniero en Industrias Alimentarias UNJBG.

Linares, T. *et al.* (2006). V Congreso Nacional del Pisco, La importancia de las lías en la calidad del pisco. Arequipa-Perú.

Monasterio Muñoz, Lyris. (1996). Evaluación física, química y organoléptica de piscos representativos de Tacna. Tacna. Tesis

para obtener el Título de Ingeniero en Industrias Alimentarias  
UNJBG.

Noguera Pujol, José. (1974). Enotecnia industrial. Ediciones Milagro.  
Lérida, España.

Norma Técnica Peruana NTP 211.020. (2003). Comisión de Reglamentos  
Técnicos y Comerciales – INDECOPI, BEBIDAS ALCOHÓLICAS.  
Alcohol etílico. Definiciones. Requisitos Lima-Perú.

Norma Técnica Peruana NTP 211.035. (2003). Bebidas Alcohólicas.  
Método de Ensayo. Determinación de metanol y de congéneres en  
bebidas alcohólicas y en alcohol etílico empleado en su  
elaboración, mediante cromatografía de gases. Lima-Perú.

Norma Técnica Peruana NTP 319.229. (2003). Comisión de Reglamentos  
Técnicos y Comerciales – INDECOPI, BEBIDAS ALCOHÓLICAS.  
Alcohol etílico. Método de ensayo. Determinación del grado  
alcohólico volumétrico. Requisitos Lima-Perú.

Norma Técnica Peruana NTP 210.025. (2003). Comisión de Reglamentos Técnicos y Comerciales – INDECOPI, BEBIDAS ALCOHÓLICAS. Método de ensayo. Determinación de furfural. Lima-Perú.

Official methods of analysis of AOAC international. (2000). Food composition, additives, natural contaminants. Volúmen II. 17<sup>th</sup> Edition. USA.

Oreglia, Francisco. (1978). Enología teórico-práctica. Vol. I. Tercera edición. Ediciones instituto Salesiano de arte gráfica. Buenos Aires- Argentina.

Palma, Juan Carlos. (2005). IV Congreso Nacional del Pisco, “Metanol en el pisco”. Moquegua-Perú.

Peynaud, Emile. (1984). Enología práctica. Segunda Edición. Ediciones Mundi-prensa. Madrid, España.

Rivera Campano, María. (1999). Producción de piscos en Agroindustria vitivinícola Antonio Biondi e Hijos S.A. Tacna. Tesis para obtener el Título de Ingeniero en Industrias Alimentarias UNJBG.

Rocha Arruda, Adriana; Renato Soares de Casimiro; Dos Santos, Antônio; Garruti, Deborah e Pint de Abreu, Fernando Antonio. (2007). Caracterização físico-química e avaliação sensorial de bebida fermentada alcoólica de banana. Rev. Ciên. Agron., Fortaleza, Vol. 38, No 4. Pag.377-384, Out.- Dez., Centro de Ciências Agrárias – Universidad e Federal do Ceará. Brasil.

Rodríguez *et al.* (2003). Efecto de la presencia de fangos de fermentación durante la destilación de caldos, sobre el contenido de esteres del pisco de la variedad de uva quebranta. CITEVID. Ica- Perú.

Sánchez Riaño, Andrea Milena. (2010). Perspectivas de uso de subproductos agroindustriales para la producción de bioetanol. Scientia et Technica Año XVII, No 46, Universidad Tecnológica de Pereira.

Satin Morton. (2000). La Irradiación de los Alimentos, Edit. Acribia, S.A. Zaragoza-España. Pág. 17.

Srinivasan, J. (1993). Solar pond technology. Sadhan. Vol. 18, Part 1. Pág. 39-55. © Printed in India.

Suescún Otero, Gina. (2005). Utilización vinícola de la opuntia dillenii  
Bistua: Revista de la Facultad de Ciencias Básicas. Vol. 3, No 001.  
Universidad de Pamplona Bucaramanga, Colombia Pág. 99-106.

Toechia Nuñez, J.C; Porta Gandara, M.A y Cervantes de Gortari, J.G.  
(2007). Análisis de exergía en estado permanente de un destilador  
solar simple. Vol.XI. Núm.1. 2010 25-34, ISSN1405-7743 FI-UNAM.  
México.

Torres Alférez, Erasmo y Alférez García, Lourdes. (2003). II Congreso  
Nacional del Pisco. "Producción, caracterización y calidad del pisco  
puro de Tacna". Instituto de Investigación, Producción y Extensión  
Agraria de Tacna (IMPRES). Tacna-Perú.

Valera López, A. y Victorino Delgado, T. (2006). Prácticas de Biología.  
FACI-UNJBG.

Yabroudi, Suher Carolina; Cárdenas, Carmen; Aldana, Leonardo; Núñez,  
José; Herrera, Lenín. (2011). Desalinización de agua empleando un  
destilador solar tubular Interciencia. Vol. 36. Pág. 731-737.  
Asociación Interciencia. Caracas, Venezuela.

Zizzias J, Fasulo A, Venier F, Marchesi J, Odicino L. (2010). Evaluación detallada de un destilador solar colector acumulador. Avances en Energías Renovables y Medio ambiente Vol 14. 63-69. ISSN 0329-5184.

**ANEXOS**

## Anexo 1

### Fotografías del trabajo de investigación.



**Foto 1.** Residuo frutícola de sandía en Magollo-Tacna.



**Foto 2.** Residuo frutícola de higos en Magollo-Tacna.



**Foto 3.** Fermentación de residuos frutícolas de sandía e higos.

## Anexo 2

### Resultados del promedio de destilación solar

Tabla 14.

Destilación solar 1: Cocina solar ck-002 con un alambique de cobre.

Tiempo (min)	Volumen (ml)
37	1
39	25
41	50
42	75
43	100
44	125
46	175
48	225
50	270
52	320
54	360
56	410
58	460
59	480

**Tabla 15.**

**Destilación solar 2: Cocina solar ck-002 con una olla de aluminio.**

<b>Tiempo (min)</b>	<b>Volumen (ml)</b>
28	1
31	50
32	75
33	100
34	125
35	150
37	200
39	250
41	300
42	350
45	400
48	465
49	480

**Tabla 16.**

**Destilación solar 3: Cocina solar sk-12 con un alambique de cobre.**

<b>Tiempo (min)</b>	<b>Volumen (ml)</b>
40	1
88	95
96	125
100	160
103	200
106	220
107	240
108	250
113	300
114	320
115	360
122	400
124	410
125	480

### Anexo 3

#### Análisis estadístico de la destilación solar

Destilación solar con una cocina solar ck-002 y alambique de cobre.

#### Results for the Overall Best-Fit Solution:

R	Rsqr	Adj Rsqr	Standard Error of Estimate	
0,9995	0,9991	0,9988	5,7211	
	Coefficient	Std. Error	t	P
y0	2221,2537	658,9755	3,3708	0,0071
a-	167,7785	41,9931-	3,9954	0,0025
b	3,8625	0,8830	4,3744	0,0014
c	-0,0258	0,0061-	4,2051	0,0018

#### Analysis of Variance:

	DF	SS	MS
Regression	4	1030298,6958	257574,6740
Residual	10	327,3042	32,7304
Total	14	1030626,0000	73616,1429

Corrected for the mean of the observations:

	DF	SS	MS	F	P
Regression	3	354457,5530	118152,5177	3609,8691	<0,0001
Residual	10	327,3042	32,7304		
Total	13	354784,8571	27291,1429		

**Destilación solar 2: cocina solar ck-002 y olla de aluminio.**

**Results for the Overall Best-Fit Solution:**

<b>R</b>	<b>Rsqr</b>	<b>Adj Rsqr</b>	<b>Standard Error of Estimate</b>
0,9993	0,9987	0,9983	6,7169

	<b>Coefficient</b>	<b>Std. Error</b>	<b>t</b>	<b>P</b>
y0	1364,5639	467,5198	2,9187	0,0171
a	-142,1487	37,3799	-3,8028	0,0042
b	4,4081	0,9821	4,4883	0,0015
c	-0,0383	0,0085	-4,5153	0,0015

**Analysis of Variance:**

	<b>DF</b>	<b>SS</b>	<b>MS</b>
Regression	4	977469,9482	244367,4871
Residual	9	406,0518	45,1169
Total	13	977876,0000	75221,2308

Corrected for the mean of the observations:

	<b>DF</b>	<b>SS</b>	<b>MS</b>	<b>F</b>	<b>P</b>
Regression	3	309861,0251	103287,0084	2289,3215	<0,0001
Residual	9	406,0518	45,1169		
Total	12	310267,0769	25855,5897		

**Destilación solar 3: Cocina solar sk-12 y alambique de cobre.**

**Results for the Overall Best-Fit Solution:**

<b>R</b>	<b>Rsqr</b>	<b>Adj Rsqr</b>	<b>Standard Error of Estimate</b>
0,9924	0,9848	0,9802	18,8597

	<b>Coefficient</b>	<b>Std. Error</b>	<b>t</b>	<b>P</b>
y0	286,8663	333,5295	0,8601	0,4099
a	-11,1422	14,1825	-0,7856	0,4503
b	0,1002	0,1757	0,5703	0,5810
c	-2,9929E-006	0,0007	-0,0044	0,9965

**Analysis of Variance:**

	<b>DF</b>	<b>SS</b>	<b>MS</b>
Regression	4	1135694,1019	283923,5255
Residual	10	3556,8981	355,6898
Total	14	1139251,0000	81375,0714

Corrected for the mean of the observations:

	<b>DF</b>	<b>SS</b>	<b>MS</b>	<b>F</b>	<b>P</b>
Regression	3	229928,3162	76642,7721	215,4764	<0,0001
Residual	10	3556,8981	355,6898		
Total	13	233485,2143	17960,4011		