

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

**POSGRADO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO
INTEGRAL DEL AGUA**

**ANÁLISIS TÉRMICO DE UN DESTILADOR SIMPLE EN
EL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE MEZCAL TIPO
ARTESANAL**

TESIS PROFESIONAL

**Que como requisito parcial
para obtener el grado de:**

Maestro en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua.

PRESENTA:

Regina Marín Cabrera

BAJO LA SUPERVISIÓN DE:

Carlos Alberto Villaseñor Perea, Dr.



APROBADA



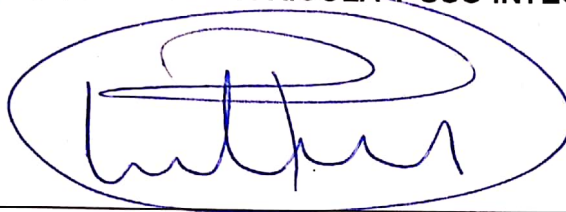
CHAPINGO, ESTADO DE MÉXICO, OCTUBRE DE 2022.

ANÁLISIS TÉRMICO DE UN DESTILADOR SIMPLE EN EL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE MEZCAL TIPO ARTESANAL

Tesis realizada por Regina Marín Cabrera bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

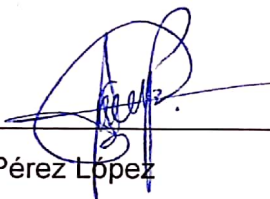
MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

DIRECTOR:



Dr. Carlos Alberto Villaseñor Perea

CODIRECTOR:



Dr. Artemio Pérez López

ASESOR:

Arturo Mancera

Dr. Arturo Mancera Rico

CONTENIDO

LISTA DE CUADROS	viii
LISTA DE FIGURAS	ix
Nomenclatura	x
DEDICATORIAS	xii
AGRADECIMIENTOS	xiii
DATOS BIOGRÁFICOS	xi
1. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.1 Referencias	4
2. REVISIÓN DE LITERATURA	6
2.1 Producción de agave	6
2.2 Producción de mezcal	7
2.3 Principales marcas de mezcal	7
2.4 Procesos para la elaboración del mezcal	8
2.4.1 Cosecha	8
2.4.2 Horneado	8
2.4.3 Molienda	9
2.4.4 Fermentación	9
2.4.5 Destilación	9
2.4.6 Embotellado	9
2.5 Breve historia de la destilación	10
2.6 Tipos de destilado	11
2.7 Destilación del mezcal	11
2.8 Procesos físicos durante la destilación	13
2.8.1 Evaporación	13
2.8.2 Condensación	13
2.9 Equipos disponibles para destilar	14
2.10 Componentes obtenidos de la destilación	14
2.11 Ecuaciones de transferencia de calor	16

Pérdida energética de la olla y del horno	17
Pérdida energética en la montera	19
a) Expuesto al aire	19
b) Expuesto al agua	19
Pérdida energética en el turbante	19
Pérdida energética en el serpentín (condensación)	19
2.12 Bibliografía	20
3. ANÁLISIS TÉRMICO DE UN DESTILADOR SIMPLE EN EL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE MEZCAL TIPO ARTESANAL	23
Resumen	23
Summary	23
3.1 Introducción	24
Nomenclatura	26
3.2 Materiales y métodos	27
3.2.1 Ubicación	27
3.2.2 Descripción del modelo	27
3.2.3 Alimentación del sistema	28
3.2.4 Instrumentación	28
Fase 1	29
Fase 2	30
Fase 3	30
3.2.5 Cálculos matemáticos	30
Pérdida energética de la olla y del horno (Q2)	31
Pérdida energética en la montera (Q3)	31
c) Expuesto al aire	31
d) Expuesto al agua	31
Pérdida energética en el turbante (Q4)	31
Pérdida energética en el serpentín (condensación)	31
3.3 Resultados y Discusiones	32

3.3.1 Mediciones obtenidas en campo	32
Etapa uno de medición	32
Etapa dos de medición	35
a) Fase 1	35
b) Fase 2	40
c) Fase 3	40
3.3.2 Análisis térmico del sistema.	42
3.4 Conclusiones	45
3.5 Referencias	46
4. ANEXOS	50

LISTA DE CUADROS

Capítulo 2

Cuadro 1. Principales productores de agave en el mundo, del año 2015 al 2019 en hectáreas.	6
Cuadro 2. Componentes del mezcal (Molina-Guerrero et al., 2007).	15
Cuadro 3. Componentes de bebidas embriagantes y su punto de ebullición (Batista & Meirelles, 2011).	16

Capítulo 3

Cuadro 1. Variables empleadas en la metodología.	32
Cuadro 2. Tiempo de destilación vs rendimiento, etapa 1.	34
Cuadro 3. Tiempo de destilación vs rendimiento, etapa 2.	37
Cuadro 4. Rendimiento de mezcal según la variedad de agave.	42
Cuadro 5. Energía requerida para el proceso de destilación	43

LISTA DE FIGURAS

Capítulo 2

Figura 1. Pérdidas de energía del sistema destilador de mezcal	16
--	----

Capítulo 3

Figura 1. Vista isométrica del destilador.	28
Figura 2. Esquema de la ubicación de sensores y de las pérdidas de energía.	29
Figura 3. Comportamiento de la temperatura dentro de la montera.	33
Figura 4. Comportamiento de la temperatura interna en la entrada del serpentín.	34
Figura 5. Comportamiento de la temperatura del agua de enfriamiento.	35
Figura 6. Comportamiento de la temperatura interna en la montera, en la segunda etapa de medición.	36
Figura 7. Comportamiento de la temperatura interna del serpentín, en la segunda etapa de medición.	36
Figura 8. Comportamiento de la temperatura en el exterior de la montera.	37
Figura 9. Comportamiento de la temperatura del agua al fondo del estanque a) y al nivel del serpentín b).	38
Figura 10. Relación del contenido alcohólico con la temperatura interna de la montera.	39
Figura 11. Mediciones en fase 2.	40
Figura 12. Caudal vs T. int. Montera, a) proceso 1, b) proceso 2, c) proceso 3.	41
Figura 13. Pérdidas energéticas en el sistema durante el proceso.	44

Nomenclatura

Símbolo	Descripción	Unidades
$H_{entrada}$	Energía de entrada del sistema	W
H_{salida}	Energía de salida del sistema	W
ΔH_{mezcla}	Energía que necesita la mezcla para la destilación	J
ΔH_{olla}	Energía que necesita la olla para la destilación	J
$\dot{Q}_2$	Pérdida energética de la olla	W
$\dot{Q}_3$	Pérdida energética en la montera	W
$\dot{Q}_4$	Pérdida energética en el turbante	W
$\dot{Q}_5$	Pérdida energética en el serpentín	W
$\dot{Q}_{2cond}$	Pérdida energética por conducción de la olla	W
$\dot{Q}_{2conv}$	Pérdida energética por convección de la olla	W
$\dot{Q}_{2rad}$	Pérdida energética por radiación de la olla	W
U_1	Pérdida energética por conducción de la montera	W
U_2	Pérdida energética por convección de la montera	W
r_1	Radio interno de la olla	m
r_2	Radio externo de la olla	m
L	Altura de la olla	m
k_{cu}	Conductividad térmica del cobre	$W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$
k_a	Conductividad térmica del ladrillo	$W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$
k_{air}	Conductividad térmica del aire	$W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$
R_{cu}	Resistencia del cobre	$W \cdot ^\circ C^{-1}$
R_a	Resistencia del ladrillo	$W \cdot ^\circ C^{-1}$
Δx	Espesor de la pared	m
A_1	Área de la pared frontal del horno	m^2
A_2	Área de la pared lateral del horno	m^2

T_{int1}	Temperatura al interior de la olla	°C
T_{ext1}	Temperatura al exterior del ladrillo	°C
T_{∞}	Temperatura suficientemente alejada de la superficie	°C
T_s	Temperatura superficial	°C
T_{int2}	Temperatura interna de la montera	°C
T_{ext2}	Temperatura de la pared superficial de la montera	°C
T_{int}	Temperatura de entrada	°C
T_{sal}	Temperatura de salida	°C
h	Coeficiente de transferencia de calor por convección	$W \cdot m^{-2} \cdot ^{\circ}C^{-1}$
A_s	Área superficial de transferencia de calor	m^2
$\mathcal{E}$	Emisividad de la superficie	Adimensional
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	$W \cdot m^{-2} \cdot ^{\circ}C^{-4}$
D	Diámetro de la geometría	m
Nu	Número de Nusselt	Adimensional
Ra	Número de Rayleigh	Adimensional
Pr	Número de Prandtl	Adimensional
Gr	Número de Grashof	Adimensional
g	Gravedad	$m \cdot s^{-2}$
β	Expansión volumétrica	$1 \cdot ^{\circ}C^{-1}$
ν	Viscosidad cinemática del aire	$m^2 \cdot s^{-1}$
$\dot{m}$	Flujo másico	$kg \cdot s^{-1}$
C_p	Calor específico del fluido	$J \cdot kg^{-1} \cdot ^{\circ}C^{-1}$
t	Tiempo	s
m	Masa	kg

DEDICATORIAS

Dedico este trabajo a Dios y mi preciosa familia que estuvo siempre presente y me dieron su cálido cariño y comprensión, aun en la dificultad de Pandemia por la que pasamos.

A mi prometido, por el cariño y comprensión ante mis momentos de angustia y estrés.

A mis amigos.

A los amantes de la virtuosa bebida de mezcal.

Regina

AGRADECIMIENTOS

Agradezco enormemente al Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del agua y a todos los doctores que lo conforman, por la formación brindada.

A la Dirección General de Investigación y Posgrado por el financiamiento otorgado a través del Proyecto 21022-DTT-62 y 22023-DTT-62.

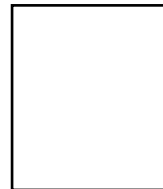
A CONACYT por el financiamiento de mis estudios de posgrado, pues sin su ayuda, no hubiera sido posible.

Al Señor José Díaz y a su hijo Jaime Díaz por la hospitalidad y disponibilidad ante la toma de mediciones realizadas en el palenque de su pertenencia.

A los doctores, Carlos Alberto Villaseñor Perea, Artemio Pérez López y Arturo Mancera Rico, por su valioso tiempo otorgado, apoyo y asesoramiento ante este trabajo.

A mi querida amiga Naykable Ardnaxela, por todo su apoyo brindado.

DATOS BIOGRÁFICOS



Datos personales

Nombre: Regina Marín Cabrera

Fecha de nacimiento: 11 de mayo de 1995

CURP: MACR950511MCSRBG01

Profesión: Ingeniero Mecánico Agrícola

Cédula profesional: 11241012

Desarrollo académico

Preparatoria Agrícola (2010-2013)	Universidad Autónoma Chapingo
Licenciatura en Ingeniería Mecánica Agrícola (2013-2017)	Universidad Autónoma Chapingo

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

La elaboración de mezcal está integrada por varias operaciones unitarias como: cosecha, horneado, molienda, fermentación y destilación. Cada operación es importante, y en gran medida, depende de cada una el producto final. Sin embargo, una operación clave durante el proceso es el destilado, el cual garantiza que la bebida sea apta para el consumo humano.

El mezcal es una bebida que desencadena una serie de actividades que activan la economía, desde la explotación de los campos para la obtención de la materia prima, hasta la venta del producto. Además de tener un impacto económico positivo en la región, esta actividad es netamente ecológica, pues está comprobado que el cultivo de agave ayuda en gran medida a la captación de CO₂ del ambiente, pudiendo mitigar el calentamiento global, además que el cultivo requiere muy poca agua a diferencia de otros que son más exigentes ("Regeneration International", 2020). Del mismo modo, Ramírez-Sorroza (2018) encontró que el bagazo de agave es un biomaterial potencial con excelentes propiedades térmicas y altamente biodegradable a diferencia de otros materiales que tienen características muy similares (Ramírez-Sorroza, 2018).

Sin embargo, la zona mezcalera de Oaxaca presenta una falta de mecanización, siendo todos sus procesos de elaboración meramente artesanales, por lo que es necesario eficientizar dichos procesos con el fin de obtener un producto de calidad y buenas ganancias monetarias. García-Vásquez et al. (2018) realizaron un estudio sobre distintos sistemas de producción en el Distrito de Tlacolula, detectando una gran experiencia en los productores, al tratarse de palenques familiares. El conocimiento en estos palenques ha sido transmitido de generación en generación, sin permitir que existan cambios significativos y que ayuden en la mejora de los procesos, lo que abre una oportunidad para hacerlo.

El abandono paulatino de los campos de producción ha conducido que exista un desabasto de agave siendo uno de los contribuyentes al encarecimiento del mezcal (Bautista, Orozco-Cirilo, y Terán-Melchor, 2015). Sin embargo, el mezcal tiene una gran ventaja al ser elaborado a partir de una amplia variedad de agaves (*Agave angustifolia*, *Agave esperima*, *Agave weberi*, *Agave potatorum*, *Agave salmiana*, entre otros) de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-070-SCFI-1994, a diferencia del tequila que solo puede ser elaborado a partir de *Agave tequilana*, mejor conocido como agave azul.

La destilación es un proceso muy antiguo, que es implementado para la extracción de distintos fluidos (agua, agua de rosas, perfumes, combustibles, aceites comestibles y esenciales, entre otros), sin embargo, para el mezcal, los estudios son muy limitados, pues se trata de una bebida con denominación de origen en México (Carrillo-Trueba, 2007). Existen diferentes tipos de destilación, dentro de ellas la destilación simple es la más conocida para la obtención del mezcal. Sin embargo, los estudios de sistemas de destilación simple son muy escasos y existe información muy limitada (Sacher, García-Llobodanin, López, Segura, & Pérez-Correa, 2013). Por otro lado, los tipos de destilación continua y por lotes, son los más utilizados debido a las ventajas que estos ofrecen (Kim & Seo, 2014; Carvallo et al., 2011). Sin embargo, la destilación simple aún sigue siendo un reto que mejorar, para quienes aún la utilizan y que por cuestiones de costos no pueden emplear una más sofisticada. Esto abre una oportunidad para poder hacerlo, ya que hasta ahora la destilación simple carece de control en cuanto a la temperatura interna de la olla, la cual define los grados alcohol de salida.

El estudio del análisis térmico de la destilación es de gran importancia, ya que a partir de éste se pueden obtener resultados que ayuden a implementar innovaciones para lograr mayor eficiencia en el uso de energía. Existen estudios de simulación para esta operación unitaria con programas como ANSYS, Aspen Plus, Prosim, entre otros, donde es necesario que previamente se haya realizado el trabajo anterior para obtener resultados exitosos (Kim & Seo, 2014). Sacher et

al. (2013) y Scanavini et al. (2009) presentaron en sus respectivas investigaciones la ecuación para obtener las pérdidas energéticas únicamente por convección de la olla. Lo que abre oportunidad para realizar el análisis del resto del sistema y tomar en cuenta las pérdidas por radiación y conducción.

Algunos de los autores que han trabajado en esta área como Sacher et al. (2013) propusieron un modelo de equilibrio de fases para predecir la captación de distintos compuestos aromáticos obtenidos a partir de un destilador tradicional. Dichos autores modelaron la recuperación del etanol, así como la dinámica de condensación y los procesos de transferencia de calor, donde obtuvieron valores de bajo error en la predicción con respecto de los valores medidos. Así también, Osorio et al. (2004), desarrollaron un modelo para describir la destilación de aguardiente de pisco con una destilación discontinua reactiva multicomponente, donde el enfoque de simulación convirtió un sistema de ecuaciones algebraicas diferenciales a un conjunto de ecuaciones diferenciales ordinarias, para después resolverlas y reemplazarlas con redes neuronales. De acuerdo con Osorio et al. (2004), la composición de la mezcla depende directamente de la temperatura y de la presión de equilibrio. Por otro lado, Valderrama et al. (2012) modelaron y simulaban un sistema de destilación por columna con el fin de obtener los componentes de mezclas complejas. En dicho estudio emplearon redes neuronales para correlacionar datos experimentales, sin embargo, los resultados tienden a ser variables y no se pueden hacer generalizaciones. Los autores aseguraron que la concentración de componentes en el fluido depende de la temperatura a la cual se destila.

Con este antecedente, se pretende que esta investigación contribuya a entender mejor el proceso de destilación del mezcal para lograr una reducción en el tiempo de proceso y un mayor control en los grados de alcohol en el destilado. Se propone como objetivo general: Analizar la transferencia de calor en un destilador simple en un proceso de producción de mezcal tipo artesanal. Los objetivos particulares son: a) Plantear una metodología para obtener un balance de energía en un destilador simple de mezcal tipo artesanal; b) Elaborar un monitor

de temperatura ; c) Monitorear la temperatura en distintas partes del destilador simple de mezcal tipo artesanal; d) Medir el contenido de alcohol en el mezcal durante el proceso de destilación.

Esta investigación consta de tres capítulos. El primer capítulo presenta la introducción general compuesto de antecedentes, problema de estudio, hipótesis y objetivo general y particulares. El capítulo dos presenta una breve revisión de literatura con respecto al problema que se estudia. El capítulo tres consta de un artículo titulado: “Análisis térmico de un destilador simple en el proceso de producción de mezcal tipo artesanal”, donde además de presentar una metodología completa para la obtención de pérdidas energéticas del sistema, también se presentan mediciones con respecto a temperatura y grados de alcohol, y el balance de energía con los datos obtenidos en campo.

1.1 Referencias

- Bautista, J. A., Orozco-Cirilo, S., & Terán-Melchor, E. (2015). The decline of craft production of mezcal in the Region of mezcal in Oaxaca, Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6, 1291–1305.
- Carrillo-Trueba, L.-A. (2007). Los destilados de agave en México y su denominación de origen. *Ciencias*, 87, 41–49.
- Carvalho, J., Labbe, M., Pérez-Correa, J. R., Zaror, C., & Wisniak, J. (2011). Modelling methanol recovery in wine distillation stills with packing columns. *Food Control*, 22(8), 1322–1332. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2011.02.007>
- García-Vásquez, A. -j., Jaramillo-Villanueva, J.-L., Vargas-López, S., Bustamante-González, A., & Barrera-Rodríguez, A.-. (2018). Tipología De Las Unidades De Producción De Mezcal Artesanal Del Distrito De Tlacolula, Oaxaca, México. *Agro Productividad*, 11(12), 71–77. <https://doi.org/10.32854/agrop.v11i12.1309>
- International, R. (2020). El poder del agave: cómo un revolucionario sistema

agroforestal y de pastoreo en México puede ayudar a revertir el calentamiento global. Retrieved from <https://regenerationinternational.org/2020/02/28/el-poder-del-agave-como-un-revolucionario-sistema-agroforestal-y-de-pastoreo-en-mexico-puede-ayudar-a-revertir-el-calentamiento-global/>

Kim, T., & Seo, T. (2014). Numerical analysis of an ethanol-water distillation system using computational fluid dynamics (CFD). *International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering*, 14(4), 1–6. Retrieved from http://ijens.org/Vol_14_I_04/141504-3838-IJMME-IJENS.pdf

Osorio, D., Pérez-Correa, R., Belancic, A., & Agosin, E. (2004). Rigorous dynamic modeling and simulation of wine distillations. *Food Control*, 15(7), 515–521. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2003.08.003>

Ramírez-Sorroza, M.-A. (2018). *Conductividad térmica de un panel biocompuesto empleando fibra de bagazo de agave Angustifolia Haw y Látex*.

Sacher, J., García-Llobodanin, L., López, F., Segura, H., & Pérez-Correa, J. R. (2013). Dynamic modeling and simulation of an alembic pear wine distillation. *Food and Bioproducts Processing*, 91(4), 447–456. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2013.04.001>

Scanavini, Helena F.A., Ceriani, R., Cassini, C. E. B., Souza, E. L. R., Maugeri Filho, F., & Meirelles, A. J. A. (2009). Cachaça production in a lab-scale alembic: Modeling and computational simulation. *Journal of Food Process Engineering*, 33(SUPPL. 1), 226–252. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.2008.00352.x>

Valderrama, J. O., Faúndez, C. A., & Toselli, L. A. (2012). Advances on modeling and simulation of alcoholic distillation. Part 1: Thermodynamic modeling. *Food and Bioproducts Processing*, 90(4), 819–831. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2012.04.004>

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Producción de agave

De acuerdo con datos de la FAO en 2019, México se posicionó como primer lugar en la producción de agave a nivel mundial, seguido de Colombia y Nicaragua como segundo y tercer lugar correspondientemente. En el Cuadro 1 se plasma la producción de agave en los principales países productores de agave en el mundo del año 2015 al 2019 (FAOSTAT, 2021).

Cuadro 1. Principales productores de agave en el mundo, del año 2015 al 2019 en hectáreas.

País	2015	2016	2017	2018	2019
México	15, 078.00	16, 560.00	18, 010.00	198, 810.00	22, 104.00
Colombia	18, 234.00	18, 326.00	18, 458.00	18, 599.00	18, 750.00
Nicaragua	5, 782.00	5, 860.00	5, 925.00	5, 985.00	6, 039.00
Cuba	7, 985.00	7, 102.00	6, 278.00	5, 655.00	5, 026.00
El Salvador	4, 081.00	4, 206.00	4, 342.00	4, 519.00	4, 711.00
Filipinas	4, 009.00	4, 114.00	4, 270.00	4, 315.00	4, 317.00
Ecuador	3, 185.00	3, 157.00	3, 177.00	3, 196.00	3, 215.00
Guatemala	213.00	190.00	193.00	195.00	198.00

Mientras tanto, de acuerdo con datos de la SIAP (2019) en el año de 2019, México cosechó una superficie mayor a 24 mil ha., donde Oaxaca ocupó el cuarto lugar en producción, con una superficie cosechada de más de dos mil ha., representando un 9.58 % de la cosecha total de ese año a nivel nacional. En los primeros tres lugares se posicionaron Jalisco con un 52.59 %, Guanajuato con un 13.15 % y Nayarit con un 10.22 %, y el 13.46 % lo suman todos los demás estados que produjeron agave en una menor proporción (SIAP, 2019).

Los Distritos de Oaxaca que reportaron mayor producción de agave son cuatro: Huajuapán de León, Valles Centrales, Istmo y Sierra Juárez, posicionándose en primer lugar Valles Centrales con una cosecha reciente en 2019 de 2, 167.67 ha (SIAP, 2019).

2.2 Producción de mezcal

México cuenta con ocho estados productores de mezcal, con la denominación de origen del producto, estos estados son: Zacatecas, Durango, Guerrero, Michoacán, San Luis Potosí, Guanajuato, Tamaulipas y Oaxaca. La mayor parte de exportación de mezcal lleva como destino Estados Unidos, con un valor de 17.2 millones de dólares, seguido de Francia (757 mil dólares), Reino Unido (619 mil dólares), España (614 mil dólares), y otras naciones. Para el año 2016, México comercializó 2 millones 713 mil litros de mezcal en los distintos mercados internacionales (EXCELSIOR, 2017).

De acuerdo con datos del Consejo Mexicano Regulador de la Calidad de Mezcal A. C. (COMERCAM) en el 2021, la producción de mezcal ascendió un poco más de ocho millones de litros, donde más de cinco millones de litros fueron destinados al mercado de exportación. De dicha producción destacó como el productor número uno el estado de Oaxaca con un 85.40 %. Según datos de COMERCAM, más del 80% de mezcal correspondió a producción artesanal, produciéndose mayormente de agave espadín (*Agave angustifolia*) (COMERCAM, 2022).

2.3 Principales marcas de mezcal

México cuenta con un sinnúmero de marcas de mezcal, algunas más conocidas que otras. De acuerdo con Bebidas-exquisitas (2021), dentro de las marcas más conocidas, se encuentran:

Mezcal Tequila Gusano Rojo. Considerado por expertos como uno de los mejores mezcales del año 2021, fabricado de manera tradicional, elaborado 100% de agave. Su presentación cuenta con un gusano de maguey color rojo ubicado en el fondo de la botella. Cuenta con un sabor ligeramente dulce y ahumado.

Mezcal San Cosme. Licor de sabor tradicional con un complejo de aromas y texturas, hecho 100% de agave, con un sabor ligeramente ahumado. Destilado con alambiques de cobre.

Mezcal Joven Montelobos. Elaborado artesanalmente con maguey espadín blanco orgánico de un sabor muy fuerte, ideal para tomar solo.

Mezcal Marca Negra. Hecho con métodos tradicionales, creado con los mezcaleros más experimentados de la región. Fabricado con agaves silvestres que otorgan sabores muy particulares.

La existencia de marcas de mezcal es muy diversa, y cada uno cuenta con sus propias características, debido a su proceso de fabricación y variedad de agave.

2.4 Procesos para la elaboración del mezcal

La producción del mezcal está integrada por una serie de procedimientos para su elaboración, donde cada uno aporta características propias para el producto final. De acuerdo con la revisión de algunos autores (Bautista et al., 2015; Carrillo-Trueba, 2007), los pasos son los siguientes:

2.4.1 Cosecha

Esta es la etapa inicial, y consiste en deshojar el agave, arrancarlos y transportarlos al lugar donde posteriormente se procesarán. En promedio, una piña de agave es cosechada a los ocho años, aunque esto depende de las condiciones de cultivo y la especie de agave.

2.4.2 Horneado

El horneado puede llevarse a cabo de dos formas, por autoclave (procesos más industrializados) o por hornos de piedra.

Algunos, optan por partir las piñas de agave para obtener una mejor cocción.

El horno consiste en un hueco en la tierra que es recubierto por piedras o por concreto, y tiene una capacidad de 4 a 7 toneladas. Se calienta con leña ya sea de encino o de mezquite, que es lo que se encuentra en la región, y se cocina en

un promedio de cuatro días, puede durar más o menos, dependiendo la cantidad de piñas, leña, el acomodo y lo eficiente que sea el horno.

2.4.3 Molienda

Una vez cocidas las piñas de maguey, se retiran del horno con ayuda de carretas y se trasladan al lugar donde se molerá. Algunos productores llevan a cabo la molienda de manera manual con garrotes de madera, sin embargo, también existe un molino chileno que consta de una piedra amonedada de cantera que pesa 500 kg y es movida por tracción animal, con la finalidad de extraer los jugos de las piñas cocidas (Durán & Pulido, 2007).

2.4.4 Fermentación

Después de la molienda se transportan los jugos extraídos de la molienda a las tinas de fermentación, para llevar a cabo el proceso.

La fermentación es un proceso bastante complejo en el que interactúan una diversidad de levaduras, bacterias y otros microorganismos y su presencia depende de diversos factores (localización geográfica, condiciones climáticas, variedad, madurez, tipo de agave), que definen el aroma y sabor de la bebida (Pérez, González-Hernández, Chávez-Parga, & Cortes-Penagos, 2013).

2.4.5 Destilación

La destilación consiste en la evaporación parcial de una mezcla con el fin de purificar una sustancia (Kockmann, 2014), lo cual se consigue elevando la temperatura del fermentado, y manteniéndola en un rango deseado que favorezca la destilación. Dicha operación puede realizarse en destiladores de cobre, carrizo o barro. Después del destilado se obtienen residuos sólidos, agua, cabezas (alcohol con alto contenido de metanol), colas (alcohol en bajo porcentaje) y el cuerpo, corazón o mezcal que es el producto de interés.

2.4.6 Embotellado

Finalmente, el mezcal es envasado en recipientes limpios, preferiblemente de cristal, para la conservación de sus propiedades. Algunos productores optan por

envasarlos con gusanos de maguey o frutas, únicamente por cuestiones de presentación.

2.5 Breve historia de la destilación

La destilación es un proceso antiguo que existe desde el año 3500 a.C. Se tienen los primeros vestigios en la antigua Mesopotamia, lugar donde se conoce que iniciaron las primeras civilizaciones. Se estipula que la destilación fue inventada por los persas quienes la emplearon para obtener productos como agua de rosas, aceites de rosas y perfumes. Para las primeras innovaciones se empleó una refrigeración por aire, con el tiempo se dieron cuenta que el enfriamiento por aire limitaba el tamaño y el rendimiento, por lo que la cambiaron para emplear una chaqueta de agua e idearon reemplazarla cuando su temperatura incrementaba. Así también el enfriamiento por agua de un tubo de vidrio en espiral se inventó alrededor de 1250 en Florencia y todavía se usa en la actualidad. En el período 1650 a 1800 tuvo un gran auge la instalación de laboratorios completos para investigaciones químicas y la producción de alcoholes y ácidos minerales. En Francia se iniciaron muchos desarrollos basados en la destilería de alcohol. Se conoce que Auguste-Pierre Dubrunfaut mejoró la columna Cellier, y escribió un libro sobre destilación que influyó en los desarrollos británicos, de whisky y ron principalmente (Kockmann, 2014).

La destilación de petróleo probablemente es la aplicación de destilación más grande de la actualidad, durante la década de 1920, la producción de gasolina pasó de la destilación discontinua a la continua. Las columnas estaban equipadas principalmente con bandejas con tapón de burbuja o similares (Kockmann, 2014).

Como resultado del aumento de la potencia de las computadoras y el desarrollo de la nueva tecnología cibernética en los años setenta y ochenta, se desarrollaron modelos y herramientas numéricas para diseñar y operar columnas de destilación, un ejemplo de ello es CFD (Kockmann, 2014), así también otros programas como Aspen Plus y ProSim Plus para simular y modelar el proceso de producción durante la destilación (Scanavini et al., 2009).

2.6 Tipos de destilado

Existen diferentes tipos de destilación, como son:

- Destilación simple
- Destilación continua
- Destilación por lotes
- Destilación por arrastre de vapor
- Destilación al vacío
- Destilación de corto recorrido
- Entre otros.

El tipo de destilación es electo según el tipo de sustancia que se desee destilar. Para el caso de esta investigación, se trata de una destilación sencilla. La destilación diferencial o sencilla se describe como aquella donde la sustancia es llevada a su punto de ebullición de manera lenta, descargando los vapores en un condensador donde la mezcla cambia de fase gaseosa a líquida, y posteriormente se almacenan en un recipiente colector (Cussler, 2012; Treybal, n.d.). En el proceso de destilado, la concentración de sus componentes va cambiando con respecto del tiempo, obteniendo los componentes más volátiles al principio y una composición más pobre al final (Treybal, n.d.).

2.7 Destilación del mezcal

La destilación es el proceso final para obtención del mezcal, y comienza cuando se coloca el fermentado en el alambique. En seguida una fuente de calor externa se encarga de elevar la temperatura del fluido a un rango de 68 a 70°C. Para el caso del tequila que tiene cierta similitud con el mezcal y que su obtención consta de equipo bien instrumentado, se emplea una presión inicial de vapor saturado a 134 kPa, a medida que la temperatura incrementa, la presión se regula a 100 kPa, y cuando alcanza la temperatura deseada y comienza el destilado, la presión es regulada en 92 kPa (Prado-Ramírez et al., 2005).

Durante el proceso de destilado, se obtienen productos volátiles y no volátiles. El principal producto obtenido y de mayor interés es el etanol, sin embargo, también se obtienen otros componentes donde alguno de ellos otorga buenas cualidades

sensoriales a la bebida, como: metanol, isoamil, isobutil, alcoholes n-propil, acetaldehído, acetato de etilo, furfural, etil lactato, ácido acético y alcohol fenetil (Molina-Guerrero et al., 2007; Pérez et al., 2013; Prado-Ramírez et al., 2005). Cada uno de los componentes tienen un punto de ebullición distinto según sus características, lo que da como resultado que durante la destilación los componentes obtenidos tengan diferentes concentraciones a lo largo del proceso. Por esta razón se aconseja dividir el mezcal con tres cortes: cabeza, corazón y cola. La cabeza contiene la mayor parte de compuestos volátiles indeseables en la mezcla, y pueden otorgar un sabor desagradable, además de ser tóxico, por lo que se recomienda desecharlo. El corazón es la mejor parte de la destilación, por su contenido en alcohol, aroma y sabor de calidad, lo cual lo hace óptimo para el consumo. La parte final denominada como cola, también debe eliminarse ya que su compuesto principal es el agua, y contiene compuestos grasos y oleosos, que suelen dar mal aroma al destilado (Spaho, 2017). Los cortes suelen hacerse por medio de tres técnicas: 1) evaluación sensorial (destiladores experimentados), 2) porcentaje de alcohol y 3) temperatura en la entrada del condensador. Para este último, el primer corte se realiza cuando la temperatura oscila entre 74-76 °C, y el segundo corte cuando alcanza una temperatura entre 87-88 °C, terminando el proceso cuando la temperatura llega hasta 93 °C. Por separado, ninguna técnica es 100 % eficiente, por lo que se aconseja combinarlas para obtener mejores resultados (Spaho, 2017). Spaho (2017) menciona que el tercer corte depende de las cualidades sensoriales de la bebida, pues mientras hay licores que se deben cortar cuando aún tienen altos niveles de alcohol, también hay licores que el corte debe ser inferior a los 40 % debido a que a estos porcentajes presentan una mejor impresión sensorial.

El metanol siendo uno de muchos componentes del mezcal en grandes concentraciones causa efectos negativos en la salud, siendo un parámetro importante en el mezcal. Debido a su alto grado de toxicidad, su concentración no debe rebasar los 12 g·L⁻¹ en alcohol al 100%, de acuerdo con la norma EU Regulations No. 110/2008 (Spaho, 2017). Sin embargo, durante la destilación,

pese a que el metanol tiene un punto de ebullición bajo (64.7°C), su destilación es llevada a cabo durante todo el proceso, junto con otros componentes, obteniendo un mayor porcentaje en las colas del destilado (Prado-Ramírez et al., 2005). Este fenómeno se presenta ya que es una sustancia altamente soluble en agua, lo que le permite tal efecto al igual que el furfural (Spaho, 2017). Sin embargo, cuando se trata de una mezcla donde el agua es escasa y el contenido de alcohol es alto, el efecto suele ser contrario.

El acetaldehído otro componente presente en los destilados de bebidas embriagantes también es de carácter nocivo para la salud, pues es el responsable de la resaca. Su contenido está influenciado por cepas de levaduras en el proceso de fermentación y el corte en el destilado (Spaho, 2017). Por ejemplo: en destilación de cidra el acetaldehído mostró un comportamiento particular, mostrando una mínima en la fracción 9 de 12. Aunque su bajo punto de ebullición (21°C) hace que la presencia del acetaldehído sea común en las cabezas, este compuesto también está presente en las colas como consecuencia de su miscibilidad en agua y su formación durante el curso de la destilación (Rodríguez et al., 2006). Así también, la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC) (citado en Lachenmeier & Sohnius, 2008) demostró la carcinogenicidad del acetaldehído en animales, por lo que se asume que es posible que también sea carcinogénico para los humanos.

2.8 Procesos físicos durante la destilación

2.8.1 Evaporación

La evaporación es el proceso mediante el cual un fluido líquido pasa a estado gaseoso. Esto sucede cuando el fluido incrementa su temperatura hasta alcanzar el calor latente. Este proceso comienza con la formación de burbujas de vapor que tienden a dirigirse hacia la superficie libre de líquido, y en este recorrido las burbujas de vapor transmiten el calor al fluido líquido (Cengel, 2007).

2.8.2 Condensación

Para el caso de la investigación, la condensación se lleva a cabo en el serpentín (sistema de enfriamiento) donde el vapor tenderá a condensarse gracias a la

formación de una película sobre la superficie (serpentín), donde se realizará la transferencia de calor hasta llegar a una temperatura por debajo de la temperatura a punto de saturación del vapor. En este punto comenzará la formación de película en la parte superior del serpentín y a medida que transcurra el tiempo, el fluido tenderá a bajar gracias a la gravedad. En el proceso de la condensación, el fluido tiene una pérdida de energía, también conocido como calor latente de vaporización (h_{fg}), y este es transferido hacia la superficie o cuerpo más próximo, en este caso el agua de enfriamiento. El cual tiene que estar a una temperatura menor para que el proceso pueda llevarse a cabo.

2.9 Equipos disponibles para destilar

Para la destilación, se encuentran muchos equipos en el mercado, de distintas capacidades, en su mayoría fabricados a partir de cobre, de precios un poco elevados. En México, existen varias empresas que dentro de sus productos que fabrican se encuentran los alambiques, como: equipos de proceso Ullmann, Diseño y Fabricaciones Industriales, Taller industrial Castillo, entre otros. Y también existen empresas dedicadas al 100% a su construcción como MUNDOBODEGA de España y DESTILADORES DE COBRE de México, Hidalgo.

Los alambiques son contruidos en su mayoría de cobre, ya que el cobre proporciona excelentes propiedades organolépticas al producto destilado, debido a su contribución en la transformación catalítica de moléculas complejas de mal olor por el contenido de azufre. Además de este beneficio, el cobre proporciona un mejor olor y sabor que los alambiques de acero inoxidable; sin embargo, los contenidos de cobre son elevados, y en algunos casos pueden sobrepasar los límites establecidos por las normas de regularización. Por ello se ha optado por tener equipos de materiales mixtos (cobre y acero inoxidable), esto con el fin de obtener un producto de calidad y que las concentraciones no sobrepasen de lo establecido (Prado-Ramírez et al., 2005).

2.10 Componentes obtenidos de la destilación

El mezcal, es una bebida ancestral de México, muy tradicional en sus distintos eventos. Tiene ciertas similitudes con otras bebidas como el tequila, bacanora,

entre otros, difiriendo en algunas particularidades. Esta clase de bebidas contiene distintos componentes.

Molina-Guerrero et al. (2007) estudiaron los compuestos volátiles en diez mezcales comerciales, analizando los extractos por cromatografía de gases y espectrofotometría de masas. Obteniendo distintos compuestos que se agrupan en acetales, ácidos, alcoholes, cetonas, aldehídos, ésteres, fenoles, furanos, y terpenos, cada uno aportando características muy propias a la bebida. Por ejemplo, el grupo de los acetales, definen las notas aromáticas de la bebida, así como los alcoholes y los ésteres, mientras que los terpenos proporcionan otras características sensoriales muy importantes.

El mezcal contiene compuestos volátiles (aromáticos) y no volátiles que son los responsables del sabor y aroma de la bebida alcohólica. Dentro de los compuestos volátiles, el metanol y otros alcoholes superiores son considerados tóxicos, por lo que su concentración tiene que ser regulado (Pérez et al., 2013). En el Cuadro 2, se observa la presencia en porcentajes de los distintos componentes que conforman el mezcal (Molina-Guerrero et al., 2007) y en el Cuadro 3 se muestran los puntos de ebullición de algunos componentes.

Cuadro 2. Componentes del mezcal (Molina-Guerrero et al., 2007).

Familia	Mezcal promedio % Área (ds)
Cetonas	1.187 (0.673)
Esteres	17.512 (9.898)
Alcoholes	63.544 (14.973)
Ácidos	6.685 (6.963)
Aldehídos	0.055 (0.106)
Furanos	1.930 (1.138)
Terpenoides	1.043 (1.172)
Fenoles	0.528 (0.587)
Acetales	6.511 (10.208)

% Área – área promedio de pico en los cromatogramas, (ds) – desviación estándar.

Cuadro 3. Componentes de bebidas embriagantes y su punto de ebullición (Batista & Meirelles, 2011).

Componente	Punto de ebullición (°C)
Agua	100.0
Etanol	78.4
Metanol	64.7
Isopropanol	82.4
Propanol	97.1
Isobutanol	108.0
Acetato de etilo	77.1
Acetaldehído	20.20
Acetona	56.53
Ácido acético	118.1

2.11 Ecuaciones de transferencia de calor

Para realizar el análisis térmico se recopilaron ecuaciones de Cengel (2007). Para calcular las pérdidas energéticas se considera el régimen estacionario de operación del destilador empleando ecuaciones de balance de energía y el principio de conservación de la energía. El sistema se visualiza en la Figura 1. Cabe recalcar que el equipo es de cobre y cuenta con una capacidad de 200 litros. El horno está fabricado a base de ladrillo común.

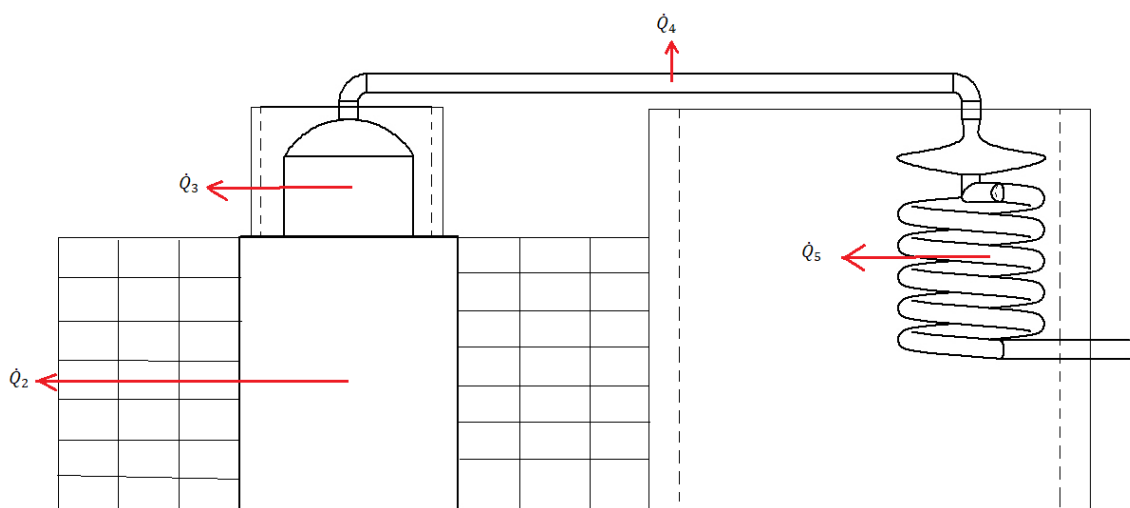


Figura 1. Pérdidas de energía del sistema destilador de mezcal.

Por lo tanto, de acuerdo con la primera ley de la termodinámica, la ecuación de balance de energía se expresa como (Ecuación 1):

$$H_{entrada} = H_{salida} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

$$H_{salida} = \Delta H_{mezcla} + \Delta H_{olla} + \Delta H_{pérdidas} \quad \text{Ecuación 2}$$

y

$$\Delta H_{mezcla} = m_{bagazo} \cdot C_{p_{bagazo}} \cdot (T_{sal} - T_{int}) + m_{líquido} \cdot C_{p_{líquido}} \cdot (T_{sal} - T_{int}) \quad \text{Ecuación 3}$$

$$\Delta H_{olla} = m \cdot C_p \cdot (T_{sal} - T_{int}) \quad \text{Ecuación 4}$$

$$\Delta H_{pérdidas} = (\dot{Q}_2 + \dot{Q}_3 + \dot{Q}_4 + \dot{Q}_5) \cdot t \quad \text{Ecuación 5}$$

A continuación, se analizan las pérdidas energéticas en el sistema.

Durante el proceso de destilación algunas de las temperaturas internas y externas pueden ser asumidas como constantes, sin embargo, se trata de un sistema cerrado.

Evaporación. El proceso de evaporación consta de pérdidas en la olla y en la montera.

Pérdida energética de la olla y del horno

Las pérdidas energéticas dentro de la olla son por conducción (ley de Fourier en Ecuación 6), y para el horno por convección natural (Ecuación 7) y radiación (Ecuación 8).

$$\dot{Q}_{2cond} = \frac{T_{int1} - T_{ext1}}{R} \quad \text{Ecuación 6}$$

$$\dot{Q}_{2conv} = h \cdot A_s \cdot (T_{ext1} - T_{\infty}) \quad \text{Ecuación 7}$$

$$\dot{Q}_{2rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A_s \cdot (T_{ext1}^4 + T_{\infty}^4) \quad \text{Ecuación 8}$$

La pérdida por conducción está en función de las resistencias opositoras al flujo de energía en el transcurso del recorrido de la energía. Siendo la sumatoria de resistencias: la resistencia del cobre más la resistencia del ladrillo para geometrías planas (Ecuación 9).

$$R = R_{cu} + R_a = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi \cdot L \cdot k_{cu}} + \frac{2}{k_a} \left(\frac{\Delta x_1}{A_1} + \frac{\Delta x_2}{A_2} \right) \quad \text{Ecuación 9}$$

El coeficiente de transferencia de calor por convección es único para cada caso, y se obtiene de la Ecuación 10 a la Ecuación 13, con ayuda de la Tabla A-15 para propiedades del aire a la presión de 1 atm (Cengel, 2007), ya que la pared exterior del horno está en contacto con el medio ambiente.

$$h = \frac{Nu \cdot k_{air}}{D} \quad \text{Ecuación 10}$$

Dado que se trata de un cilindro vertical lo suficientemente grande, este se puede tratar como una placa vertical, de tal forma que los efectos de la curvatura serán despreciables (Cengel, 2007). Teniendo en cuenta este aspecto, para tal configuración el número de Nusselt se calcula según la Ecuación 11.

$$Nu = \left(0.825 + \frac{0.387 Ra^{\frac{1}{6}}}{\left(1 + \left(\frac{0.492}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right)^{\frac{8}{27}}} \right)^2 \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde el número de Rayleigh (Ecuación 12) y el número de Grashof (Ecuación 13) son:

$$Ra = Gr \cdot Pr \quad \text{Ecuación 12}$$

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_s - T_{\infty}) \cdot L_c^3}{\nu^2} \quad \text{Ecuación 13}$$

Pérdida energética en la montera

La pérdida en la montera se calcula para dos tiempos: a) expuesto al aire, y b) expuesto al agua.

a) Expuesto al aire

Este cálculo representa el momento en que da inicio el proceso, hasta antes de la primera refrescada que se realiza. Se obtiene con la Ecuación 14, con el coeficiente de transferencia de calor, sin aislamiento al aire en calma (Woods, 2007).

$$\dot{Q}_{3_1} = U_1 \cdot A_s \cdot (T_{ext2} - T_{\infty}) \quad \text{Ecuación 14}$$

b) Expuesto al agua

La segunda condición es cuando se somete al enfriamiento del agua (refrescada). Para esta condición se emplea la Ecuación 14, con un coeficiente de transferencia de calor aislado del aire en reposo (U_2).

Pérdida energética en el turbante

Para calcular la pérdida en el turbante se emplea la Ecuación 15 puesto que se conocen las temperaturas de entrada y salida del fluido. Además, el valor del C_p se puede estimar mediante ecuaciones empíricas.

$$\dot{Q}_4 = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_{int} - T_{sal}) \quad \text{Ecuación 15}$$

Pérdida energética en el serpentín (condensación)

Se empleó la Ecuación 15, por la dificultad de implementar un sistema de monitoreo de la temperatura en el serpentín ya que está inmerso en agua.

2.12 Bibliografía

- Batista, F. R. M., & Meirelles, A. J. A. (2011). Computer simulation applied to studying continuous spirit distillation and product quality control. *Food Control*, 22(10), 1592–1603. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2011.03.015>
- Bautista, J. A., Orozco-Cirilo, S., & Terán-Melchor, E. (2015). The decline of craft production of mezcal in the Region of mezcal in Oaxaca, Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6, 1291–1305.
- Bebidas-exquisitas. (2021). El mejor mezcal. Retrieved from <https://bebidasexquisitas.com/el-mejor-mezcal/>
- Carrillo-Trueba, L.-A. (2007). Los destilados de agave en México y su denominación de origen. *Ciencias*, 87, 41–49.
- Cengel, Y. A. (2007). Transferencia de calor y masa. Un enfoque practico. (M. G. Hill, Ed.), *Biotechnology Letters* (Tercera ed, Vol. 18). 2007. <https://doi.org/10.1007/BF00129346>
- COMERCAM. (2022). Consejo Mexicano Regulador de la Calidad del Mezcal, Informe Estadístico 2022.
- Cussler, E. L. (2012). Differential Distillation. In *Diffusion* (pp. 353–374). <https://doi.org/10.1017/cbo9780511805134.014>
- Durán, H.-M., & Pulido, J.-L. (2007). Análisis de la Molienda en el Proceso de Elaboración de Mezcal. *Información Tecnológica*, (December 2006), 47–52. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642007000100008>
- EXELSIOR. (2017, March 25). Mezcal, orgullosamente mexicano llega a 38 países.
- FAOSTAT. (2021). Cultivos. Retrieved from <http://fenix.fao.org/faostat/internal/es/#data/QC>

- Kockmann, N. (2014). History of Distillation. Distillation: Fundamentals and Principles. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-386547-2.00001-6>
- Lachenmeier, D. W., & Sohnius, E. M. (2008). The role of acetaldehyde outside ethanol metabolism in the carcinogenicity of alcoholic beverages: Evidence from a large chemical survey. *Food and Chemical Toxicology*, 46(8), 2903–2911. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2008.05.034>
- Molina-Guerrero, J. A., Botello-Álvarez, J. E., Estrada-Baltazar, A., Navarrete-Bolaños, J. L., Jiménez-Islas, H., Cárdenas-Manríquez, M., & Rico-Martínez, R. (2007). Volatile components in Mezcal. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 6(1), 41–50.
- Padro-Ramírez, R. (2014). Tequila and mezcal distillation technology: Similarities and differences. *Sustainable and Integral Exploitation of Agave*.
- Pérez, E., González-Hernandez, J.-C., Chávez-Parga, M.-C., & Córtes-Penagos, C. (2013). Caracterización fermentativa de levaduras productoras de etanol a partir de jugo de Agave cupreata en la elaboración de mezcal. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 12, 451–461. Retrieved from <http://www.scielo.org.mx/pdf/rmiq/v12n3/v12n3a8.pdf>
- Prado-Ramírez, R., Gonzáles-Alvarez, V., Pelayo-Ortiz, C., Norberto Casillas, Estarrón, M., & Gómez-Hernández, H.-E. (2005). The role of distillation on the quality of tequila. *International Journal of Food Science and Technology*, 40(7), 701–708. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2005.00983.x>
- Rodríguez, R. M., Suárez, B. V., García, A. H., García, O. F., Fernández, N. T., & Mangas, J. J. A. (2006). Production and composition of cider spirits distilled in “alquitara.” *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54(26), 9992–9997. <https://doi.org/10.1021/jf062316h>
- Scanavini, Helena F.A., Ceriani, R., Cassini, C. E. B., Souza, E. L. R., Maugeri Filho, F., & Meirelles, A. J. A. (2009). Cachaça production in a lab-scale

alembic: Modeling and computational simulation. Journal of Food Process Engineering, 33(SUPPL. 1), 226–252. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.2008.00352.x>

SIAP. (2019). Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. Retrieved from <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>

Spaho, N. (2017). Distillation Techniques in the Friu. In Distillation Innovative Applications and Modeling (Vol. Chapter 6, p. 24).

Treybal, R. E. (n.d.). Operaciones de transferencia de masa.

Woods, D. R. (2007). Rules of Thumb in Engineering Practice. WILEY.

3. ANÁLISIS TÉRMICO DE UN DESTILADOR SIMPLE EN EL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE MEZCAL TIPO ARTESANAL

THERMAL ANALYSIS OF A SIMPLE DISTILLER IN THE PRODUCTION PROCESS OF ARTISANAL MEZCAL

Resumen

La destilación es un proceso por el cual se obtienen diferentes tipos de fluidos, entre ellos el mezcal, destacado por su denominación de origen. Un problema que se presenta es el poco estudio dedicado a la bebida y al tipo de destilación. Este proyecto tiene como objetivo realizar un análisis térmico durante el proceso de destilación en un destilador artesanal de mezcal. Lo cual puede contribuir en una reducción de tiempo y mayor porcentaje de alcohol en el fluido. Se construyó un sistema para monitorear un destilador de cobre con capacidad de 200 litros. Los datos obtenidos se introdujeron en una metodología para obtener un balance térmico del sistema. Los datos arrojados por las mediciones indicaron una alta correlación de la temperatura interna de la montera con respecto al caudal y el porcentaje de alcohol en el mezcal. Se obtuvieron buenos niveles de alcohol en el mezcal con temperaturas de 85°C a 89°C. Debido a que el sistema se alimenta con leña es difícil tener un control en la temperatura interna, por lo que se recomienda realizar pocas atizadas con el fin de que exista estabilidad en la temperatura interna.

Palabras clave: energía, destilación, contenido alcohólico, mezcal.

Summary

The distillation is a process by which different types of fluids are obtained, mezcal among them, highlighted by its denomination of origin. A problem that arises is the few studies dedicated to the beverage and the type of distillation. This project

aims to perform a thermal analysis during the distillation process in an artisanal mezcal distiller. This process can contribute to a reduction of time and a higher percentage of alcohol in the fluid. A measurement system was applied to a 200-liter copper distiller. The data obtained were introduced into a methodology to obtain a heat balance of the system. The data indicates a high correlation in the internal temperature of the condenser with respect to the flow rate and the percentage of alcohol in the mezcal. High levels of alcohol were obtained in the mezcal at temperatures from 85°C to 89°C. Since the system is heated with wood, it's difficult to control the internal temperature, a few stirrings are recommended to maintain a uniform temperature.

Keywords: energy, distillation, alcoholic content, mezcal.

3.1 Introducción

La destilación es un proceso que consiste en separar un fluido, elevando la temperatura hasta su punto de ebullición, para después condensarlo (Cussler, 2012; Spaho, 2017; Treybal, n.d.). El punto de ebullición varía según el fluido, y esto va en función de la densidad, ya que fluidos menos densos tienden a evaporarse más fácilmente, aunque cuando se encuentran acompañados de otros componentes se pueden comportar de una manera distinta (Prado-Ramírez et al., 2005). La destilación se ha convertido en un proceso muy importante debido a que hace posible la obtención de diversos fluidos como bebidas alcohólicas (coñac, tequila, vino, mezcal, etc.), combustibles, tratamiento de aguas y obtención de esencias (Cerón-Salazar, 2009; Padro-Ramírez et. al, 2014; Sacher et. al, 2013). Los métodos de destilación son distintos según la bebida que se desea obtener, ya que cada mezcla tiene requisitos únicos para el correcto destilado (Spaho, 2017). Para bebidas con un grado de alcohol mayor y de mayor pureza, se emplean equipos más sofisticados, pero de mayor costo, como destiladores de torre.

La medición es considerada un proceso básico para la ciencia con el fin de probar diversas teorías o mejorar procesos, por lo que se ha vuelto tan importante en cada línea de investigación. En el ámbito de la destilación, la instrumentación

también ha ido evolucionando con el tiempo, empezando con los primeros vestigios donde iniciaron las primeras civilizaciones (Mesopotamia, China, Siria y Egipto), que emplearon la destilación para obtener principalmente agua de rosas, aceite de rosas y perfumes en equipos de destilación muy sencillos (Kockmann, 2014), hasta el día de hoy que se conocen equipos con tecnologías más avanzadas. Aunque de acuerdo con Sacher et al. (2013), los estudios dedicados a la destilación simple son relativamente pocos, ya que la destilación por columna y por lotes tienen abarcado la mayor parte de los procesos de destilación debido a la gran cantidad de ventajas que estos ofrecen (Carvallo et al., 2011; Kim & Seo, 2014; Osorio et al., 2004; Valderrama et al., 2012), por lo que algunos investigadores tienden a dar menos prioridad a los procesos tradicionales. Sin embargo, la destilación simple aún sigue siendo un reto que mejorar, puesto que también es muy utilizada en productores de menor escala.

El análisis térmico durante la destilación es de gran importancia, debido a que se llevan a cabo diferentes interacciones de transferencia de calor en el sistema, siendo algunas de mayor importancia. Sin embargo, las metodologías de cálculo realizadas hasta el momento son escasas. Existen estudios con programas conocidos como ANSYS (Kim & Seo, 2014) y Aspen Plus (Gaiser et al., 2002), donde para obtener resultados acertados, previamente es necesario realizar el trabajo anterior (levantamiento de campo). Sacher et al. (2013) y Scanavini et al. (2009) presentaron en sus respectivas investigaciones, únicamente el análisis de las pérdidas energéticas por convección de la olla, sin embargo, no se plantea un desarrollo en extenso, ni se toman en cuenta otra clase de pérdidas. Otros autores como Sumana & Venkateswarlu (2007) realizaron la programación de un sensor suave para la estimación de composición en una columna de destilación reactiva. De un modo similar, Rani et. al (2013) realizaron la programación de un sensor suave por medio de redes neuronales para detectar la composición del destilado a partir de la temperatura en un destilador de columna. En la actualidad son diversos los autores que trabajan en esta línea de investigación, y la principal razón es que la temperatura influye altamente en la calidad del destilado y de ello depende la composición (Rani et al., 2013). Los equipos disponibles para obtener

la composición del destilado son de alto costo, por lo que lo más viable es controlar la temperatura para obtener un control sobre la composición (Luyben, 2006).

Dentro de las bebidas alcohólicas de México que son obtenidas por medio de la destilación, resalta el tequila y el mezcal con denominación de origen (Carrillo-Trueba, 2007). Destacando por sus procesos artesanales la bebida virtuosa del mezcal (Durán-García, et. al, 2007). Donde incluso la destilación es un proceso un tanto artesanal, pues la leña empleada para el proceso aporta un mejor aroma y sabor al producto final. Durante el proceso de destilación es significativo tener en cuenta dos procesos: evaporación y condensación, ya que ambos fenómenos juegan papeles muy importantes en el proceso, donde un aspecto muy relevante es su balance energético (Sacher et al., 2013), por lo que se propone la elaboración de un análisis térmico durante el proceso de destilación en un destilador artesanal de mezcal. Se espera que los datos arrojados por las mediciones y posteriormente en los cálculos, sean de utilidad para implementar mejoras en la operación unitaria de la destilación.

Nomenclatura

Símbolo	Descripción	Unidades
$H_{entrada}$	Energía de entrada del sistema	W
H_{salida}	Energía de salida del sistema	W
ΔH_{mezcla}	Energía que necesita la mezcla para la destilación	J
ΔH_{olla}	Energía que necesita la olla para la destilación	J
$\dot{Q}_2$	Pérdida energética de la olla	W
$\dot{Q}_3$	Pérdida energética en la montera	W
$\dot{Q}_4$	Pérdida energética en el turbante	W
$\dot{Q}_5$	Pérdida energética en el serpentín	W
U_1	Pérdida energética por conducción de la montera	W
U_2	Pérdida energética por convección de la montera	W

R_{cu}	Resistencia del cobre	$W \cdot ^\circ C^{-1}$
R_a	Resistencia del ladrillo	$W \cdot ^\circ C^{-1}$
T_{int1}	Temperatura al interior de la olla	$^\circ C$
T_{ext1}	Temperatura al exterior del ladrillo	$^\circ C$
T_∞	Temperatura suficientemente alejada de la superficie	$^\circ C$
T_s	Temperatura superficial	$^\circ C$
T_{int2}	Temperatura interna de la montera	$^\circ C$
T_{ext2}	Temperatura de la pared superficial de la montera	$^\circ C$
T_{int}	Temperatura de entrada en el turbante	$^\circ C$
T_{sal}	Temperatura de salida del turbante	$^\circ C$
h	Coficiente de transferencia de calor por convección	$W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$
A_s	Área superficial de transferencia de calor	m^2
ε	Emisividad de la superficie	Adimensional
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	$W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-4}$
C_p	Calor específico del fluido	$J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$
$\dot{m}$	Flujo másico	$kg \cdot s^{-1}$
t	Tiempo	s
m	Masa	kg

3.2 Materiales y métodos

3.2.1 Ubicación

El cálculo se realizó para un equipo ubicado en el Sitio de Xitlapehua, Oaxaca, situado a una latitud de 16° 21' 3" Norte y longitud: 96° 31' 58" Oeste, a 1570 msnm, y una presión atmosférica de 83.8405 kPa.

3.2.2 Descripción del modelo

El modelo consta de un destilador simple de cobre en forma cilíndrica de 0.6 m de diámetro por 0.75 m de altura, con un cilindro adyacente de 0.355 m de diámetro y 0.22 m de altura, acoplado a un casquete polar de 0.10 m de altura donde se acumula el flujo de vapor que conecta a una tubería de 2 in, con una

longitud de 1.5 metros, desembocando el fluido a un plato del que parte un serpentín de 48 centímetros de cinco vueltas (Figura 1).

3.2.3 Alimentación del sistema

El sistema tiene como fuente de energía únicamente la leña.

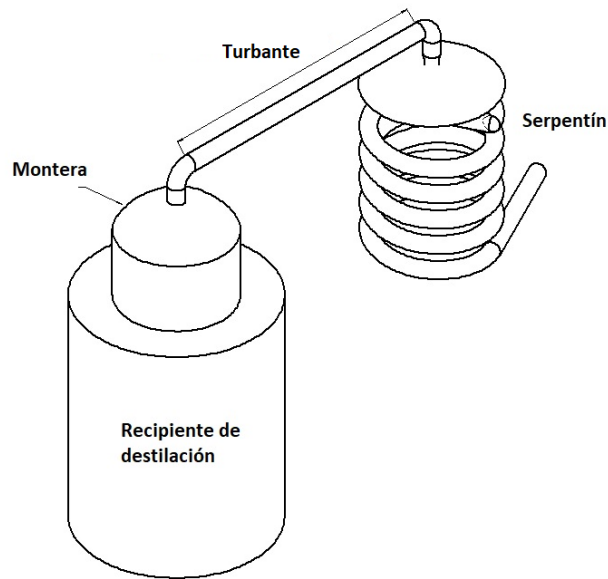


Figura 1. Vista isométrica del destilador

3.2.4 Instrumentación

Se realizaron 2 etapas de mediciones. La primera se realizó del 29 al 01 de octubre del 2021, con tres sensores de temperatura DS18B20, se realizaron seis repeticiones. Se destiló un ensamble de maguey bicuishe-espadín, donde la variedad bicuishe estaba en mayor proporción. Para la segunda etapa, se emplearon 6 sensores de temperatura DS18B20. El equipo empleado para ambas mediciones fue diseñado para este experimento en específico, y se describe en el Anexo A. Para ambos casos se guardaron datos cada 5 segundos.

El suministro de energía fue llevado a cabo durante la primera etapa según el conocimiento empírico del productor, dicho control fue basado según el contenido de alcohol del mezcal que era conocido gracias a la prueba de la perla, la cual demuestra un alto contenido de alcohol (Rage et al., 2020). Y para la segunda etapa, se alimentó de leña únicamente al inicio del proceso y ante cada

refrescada, para reducir la variación de la temperatura interna de la olla. Se optó por realizar esta técnica debido a la dificultad en el control de la temperatura interna de la olla en la primera etapa de medición.

La segunda etapa de medición se dividió a la vez en tres fases. Las fases entre sí difirieron en el acomodo de sensores y las mediciones de otras variantes.

Fase 1

La fase uno se llevó a cabo del día 1 al 3 de abril del 2022. Se midió contenido de alcohol con un densímetro para alcohol con termómetro, escala 0 A 100 % marca TFA Dostmann. En esta etapa, el fuego se alimentó únicamente al inicio con cuatro a cinco leños que sumaban de 0.0504 m³ a 0.063 m³, esta práctica se repitió para cada fase. De esta manera la temperatura incrementó de manera gradual, y se alimentó con un leño más ante cada refrescada de la montera.

El acomodo de los sensores se realizó como se muestra en la Figura 2 para cada una de las fases.

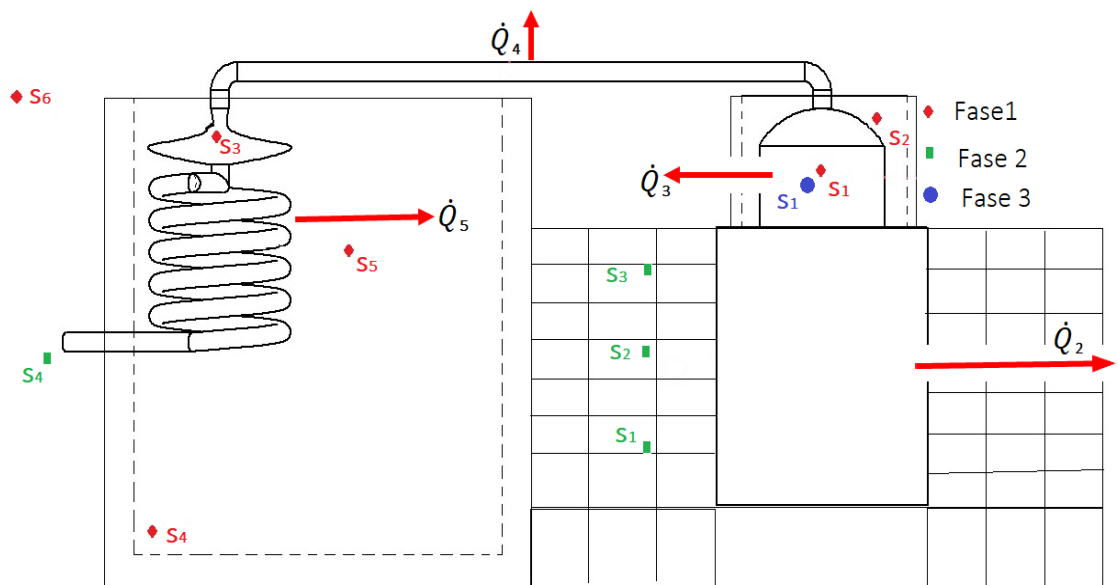


Figura 2. Esquema de la ubicación de sensores y de las pérdidas de energía.

Las mediciones de contenido alcohólico se realizaron cada cinco minutos durante el proceso de recolección del mezcal, evitando las colas (shishe).

Se utilizó el agave espadín para elaborar la mezcla utilizada en cada uno de los seis procesos.

Fase 2

La fase dos se llevó a cabo el día 3 y 4 de abril del 2022. Se utilizó agave espadín para elaborar la mezcla de la primera y tercera repetición, y para la segunda repetición se utilizó agave bicuishe.

Fase 3

La tercera fase se llevó a cabo el día 4 y 5 de abril del 2022, la mezcla de la primera postura fue una combinación de agave espadín con bicuishe, y para las dos últimas posturas se trató únicamente de bicuishe. En esta fase se midió la velocidad de destilación con respecto a la temperatura en algunas partes del sistema. Para ello, se dispuso de una probeta de 100 ml, y un cronómetro. El flujo volumétrico del destilado se tomó cada cinco minutos, y se midieron mililitros obtenidos por unidad de tiempo (segundos), para posteriormente obtener el caudal ($L \cdot h^{-1}$). Se obtuvieron los datos de inicio del proceso hasta la obtención completa del mezcal.

3.2.5 Cálculos matemáticos

Para realizar los cálculos de pérdidas energéticas, se consideró el régimen estacionario de operación del destilador empleando ecuaciones de balance de energía y el principio de conservación de la energía.

Por lo tanto, de acuerdo con la primera ley de la termodinámica, el sistema expresa que la energía de entrada es equivalente a la energía de salida que incluye la energía requerida por la mezcla, olla y pérdidas en la Ecuación 1 (Cengel, 2007):

$$H_{\text{entrada}} = \Delta H_{\text{mezcla}} + \Delta H_{\text{olla}} + \Delta H_{\text{pérdidas}} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde: ΔH_{mezcla} y ΔH_{olla} se calculan con la Ecuación (2); la energía de la mezcla es la energía del líquido más la energía requerida por el bagazo y las pérdidas del sistema $\Delta H_{\text{pérdidas}}$ están dadas por la Ecuación (3):

$$\Delta H = m \cdot C_p \cdot (T_{sal} - T_{int}) \quad \text{Ecuación 2}$$

$$\Delta H_{p\acute{e}rdidas} = (\dot{Q}_2 + \dot{Q}_3 + \dot{Q}_4 + \dot{Q}_5) \cdot t \quad \text{Ecuación 3}$$

Pérdida energética de la olla y del horno ($\dot{Q}_2$)

Las pérdidas energéticas de la olla son por conducción (ley de Fourier), más pérdidas del horno por convección natural y radiación al ambiente.

$$\dot{Q}_2 = \frac{(T_{int1} - T_{ext1})}{R_{cu} + R_{la}} + h \cdot A_s \cdot (T_{ext1} - T_{\infty}) + \varepsilon \cdot \sigma \cdot A_s \cdot (T_{ext1}^4 + T_{\infty}^4) \quad \text{Ecuación 4}$$

Pérdida energética en la montera ($\dot{Q}_3$)

La pérdida en la montera se calcula para dos tiempos: a) expuesto al aire, y b) expuesto al agua.

c) Expuesto al aire

Este cálculo representa el momento en que da inicio el proceso, hasta antes de la primera refrescada que se realiza. Se obtiene con la Ecuación (5), con el coeficiente de transferencia de calor, sin aislamiento al aire en calma (Woods, 2007).

$$\dot{Q}_{3_1} = U_1 \cdot A_s \cdot (T_{ext1} - T_{\infty}) \quad \text{Ecuación 5}$$

d) Expuesto al agua

La segunda condición es cuando se somete al enfriamiento del agua (refrescada). Para esta condición se emplea la Ecuación 5, con un coeficiente de transferencia de calor aislado del aire en reposo (U_2).

Pérdida energética en el turbante ($\dot{Q}_4$)

La pérdida del turbante es obtenida con la Ecuación 6.

$$\dot{Q}_4 = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_{int} - T_{sal}) \quad \text{Ecuación 6}$$

Pérdida energética en el serpentín (condensación)

Se empleó la Ecuación 6, debido a la dificultad para la obtención de otro tipo de variables de entrada.

Cuadro 1. Variables empleadas en la metodología.

Variable	Valor	Variable	Valor
m_{bagazo}	135.1 kg	Cp_{cobre}^3	420 J·kg ⁻¹ ·°C ⁻¹
$m_{líquido}$	44.9 kg		
m_{olla}	35.3 kg		
Cp_{bagazo}^1	1905.59 J·kg ⁻¹ ·°C ⁻¹	U_1^4	0.0075 kW·m ⁻² ·°C ⁻¹
$Cp_{líquido}^2$	2420 J·kg ⁻¹ ·°C ⁻¹	U_2^4	0.003 kW·m ⁻² ·°C ⁻¹
K_{cu}	52 W·m ⁻¹ ·°C ⁻¹		

¹ - (Ramírez-Sorroza, 2018), ² - (UNAM, 2008), ³ - (Cengel, 2007), ⁴ - (Woods, 2007).

3.3 Resultados y Discusiones

3.3.1 Mediciones obtenidas en campo

Etapas de medición

Las repeticiones fueron un poco cambiantes entre sí, debido a algunos factores que se presentaron (ambientales y dificultad en el control de temperatura). Estos cambios se visualizaron principalmente en la temperatura interna de la montera (Figura 3), ya que ésta, tiene un mayor contacto con el medio ambiente o el agua de enfriamiento.

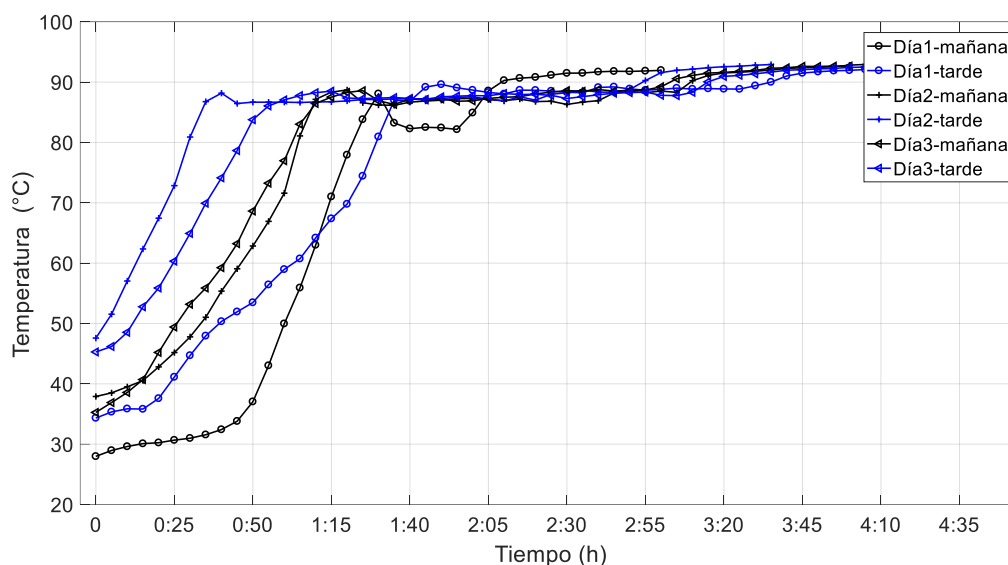


Figura 3. Comportamiento de la temperatura dentro de la montera.

Las repeticiones de color negro representan el primer proceso del día, y las de color azul, la segunda repetición. Debido a que por la mañana se tiene una temperatura ambiental más baja, se observa cómo el proceso requiere de mayor energía a diferencia de la tarde, que es cuando además del clima cálido, el sistema ya ha ganado energía considerable del proceso anterior.

La temperatura interna de la montera mostró un crecimiento lineal, del tiempo cero hasta la primera hora, después se mantuvo en un intervalo de poca oscilación que se logró controlando las atizadas (alimentación del fuego). Para la destilación del mezcal se tomó un tiempo promedio de 2.35 horas. En el Cuadro 2, se puede observar el tiempo de destilación de cada lote, así como el volumen de mezcal obtenido. Después de ese tiempo se comenzó a destilar las colas, conocido localmente como shishe, dicha colecta se inició después de los 90 °C. Al no ser un fluido de interés la energía provista fue mayor sin tener ningún control con el fin de reducir el tiempo de obtención.

De acuerdo con el Cuadro 2, en el proceso 1 y 5 se observan bajos rendimientos de mezcal lo cual fue debido a un descontrol en la temperatura interna de la montera que es visible en la Figura 3, esto condujo a que el tiempo de destilación

se redujera y como resultado de la reducción de tiempo, también disminuyó el rendimiento de fluido. Mientras que por la tarde se observó un mayor rendimiento.

Cuadro 2. Tiempo de destilación vs rendimiento, etapa 1.

N° de proceso	Tiempo de destilación (min)	TP.int. M.	Volumen de destilado (L)
1	52	85.8	5.6
2	190	88.4	7.6
3	136	87.3	11
4	165	87.2	10.5
5	139	87.7	9.5
6	169	87.8	13

TP. int. M- Temperatura promedio en el interior de la montera. El proceso 1, 3, 5 corresponde a mediciones tomadas por la mañana, y el 2, 4 y 6 corresponde a la tarde.

En la Figura 4, se observa una gran oscilación en la temperatura a la entrada del serpentín. Lo cual se debió a que la destilación no fue constante, es decir, que la temperatura del fluido en la entrada del serpentín dependió del flujo másico del vapor que provenía de la montera.

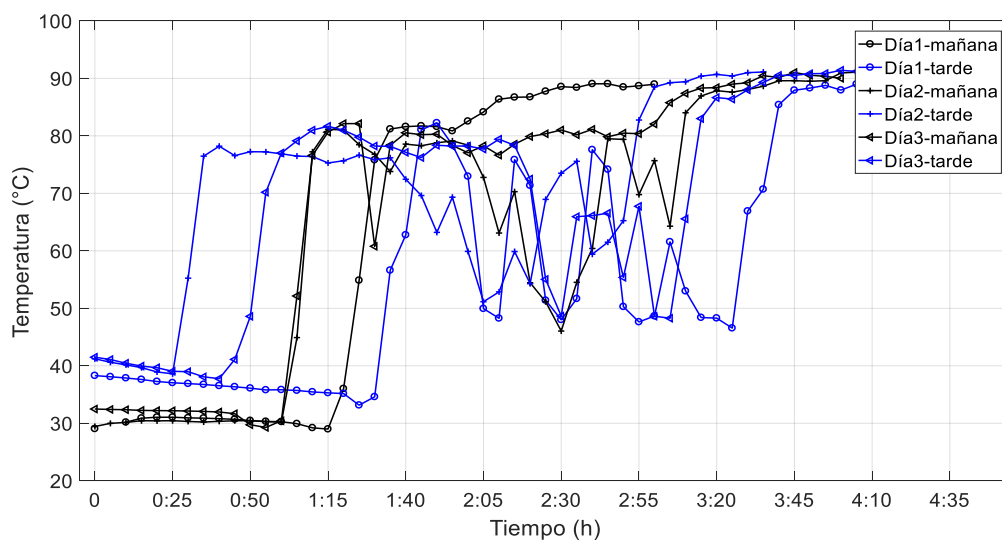


Figura 4. Comportamiento de la temperatura interna en la entrada del serpentín.

En la Figura 5, teniendo en cuenta que la destilación comienza después de aproximadamente una hora se observa como la temperatura del agua de enfriamiento permaneció arriba de 32 °C por las mañanas, y por las tardes permaneció arriba de 36°C, sin embargo, el proceso del día2-tarde y día3-tarde

presentaron temperaturas mayores a 40°C, esto se debió a la energía acumulada por procesos anteriores.

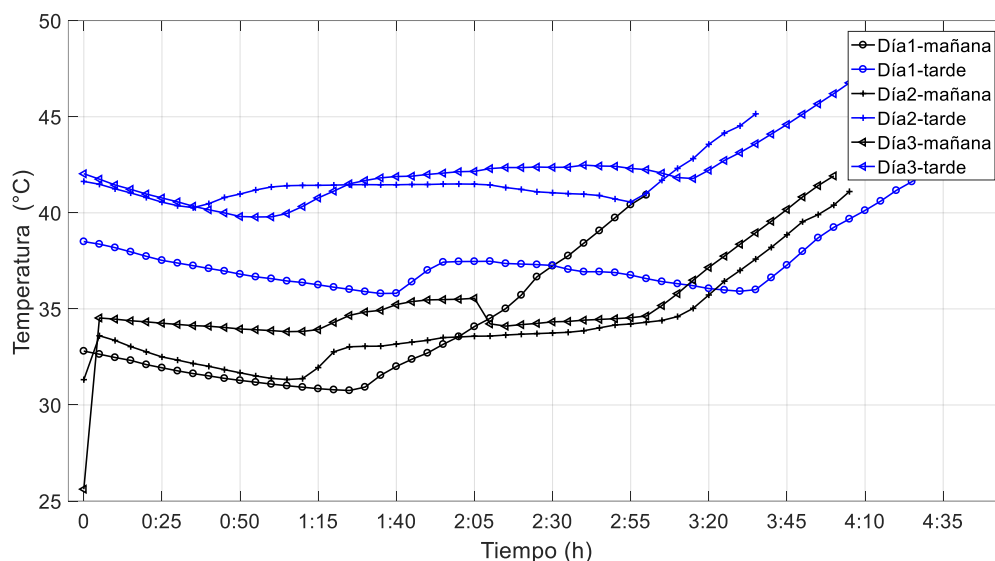


Figura 5. Comportamiento de la temperatura del agua de enfriamiento.

Etapa dos de medición

a) Fase 1

El comportamiento de la temperatura interna de la montera se muestra en la Figura 6. Dichos datos mostraron un comportamiento muy similar a los de la etapa uno de medición. Gracias a la técnica de no atizado se obtuvo una oscilación menor durante la destilación, aunque dicha estabilidad se vio reflejada en un incremento de tiempo (Cuadro 3), pero también se obtuvo un fluido con un porcentaje de alcohol constante por más tiempo, lo que se tradujo en un mayor volumen de mezcal. En cada uno de los seis procesos se observaron dos ligeras caídas de temperatura, las cuales corresponden a las dos refrescadas que se realizaron. La temperatura media durante todo el proceso fue de 85.6°C.

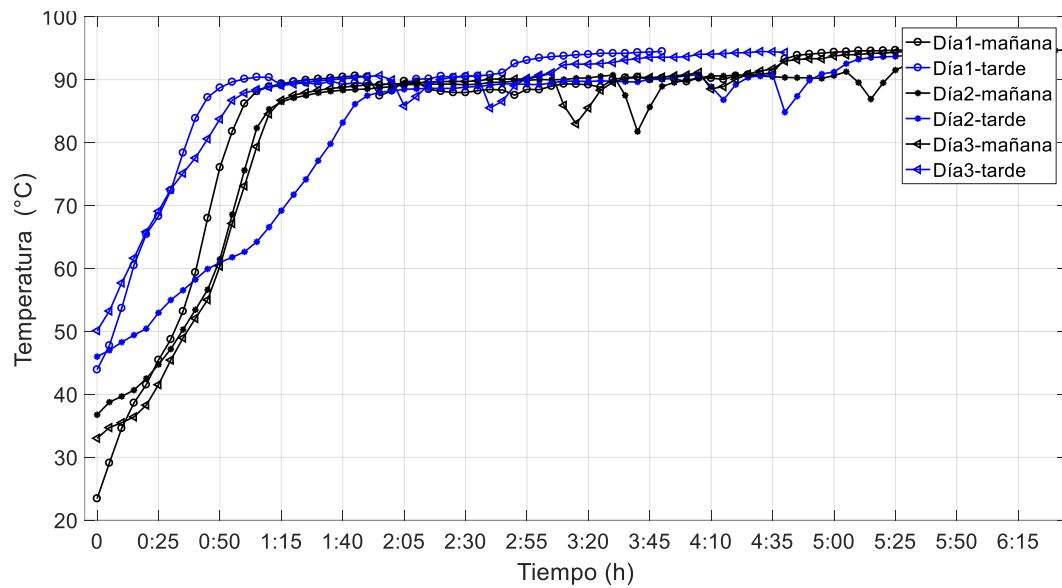


Figura 6. Comportamiento de la temperatura interna en la montera, en la segunda etapa de medición.

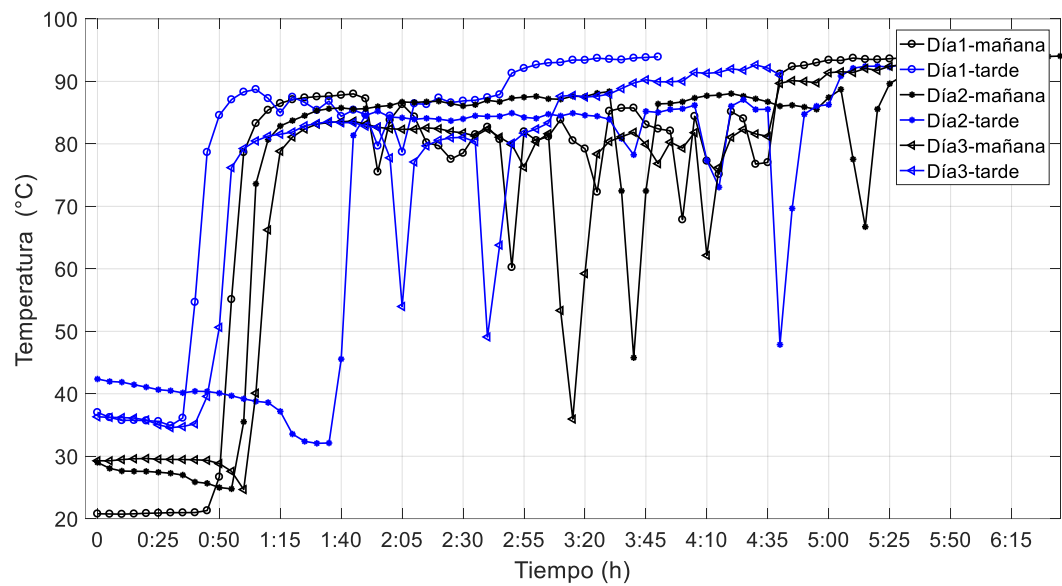


Figura 7. Comportamiento de la temperatura interna del serpentín, en la segunda etapa de medición.

El comportamiento de la temperatura interna del serpentín presentó caídas de temperatura en momentos de bajo o nulo flujo (Figura 7).

Se observó un mayor rendimiento de fluido por la mañana (Cuadro 3).

En la Figura 8 se observa una oscilación alta en la temperatura del exterior de la montera debido a la interacción directa con el medio ambiente o con el agua de enfriamiento.

Cuadro 3. Tiempo de destilación vs rendimiento, etapa 2.

N° de proceso	Tiempo de destilación (min)	TP.int. M.	Volumen de destilado (L)
1	195	88.9	19
2	120	89.7	14
3	260	89.0	20
4	200	89.0	18
5	195	88.9	19
6	130	89.0	17

TP. int. M- Temperatura promedio en el interior de la montera. El proceso 1, 3, 5 corresponde a mediciones tomadas por la mañana, y el 2, 4 y 6 corresponde a la tarde.

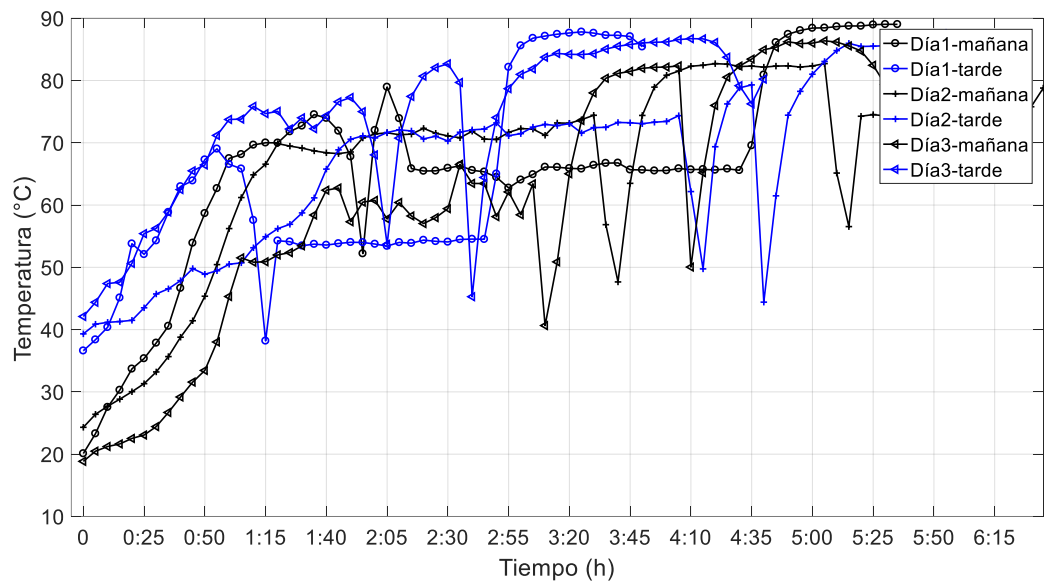


Figura 8. Comportamiento de la temperatura en el exterior de la montera, en la segunda etapa de medición.

En la Figura 9 se observaron bajas temperaturas del agua en los primeros procesos, y posteriormente un incremento de temperatura debido a la energía acumulada. Después del tercer proceso, el agua se recirculo en el estanque y se añadió un poco de agua fresca por lo que la temperatura no incrementó tanto.

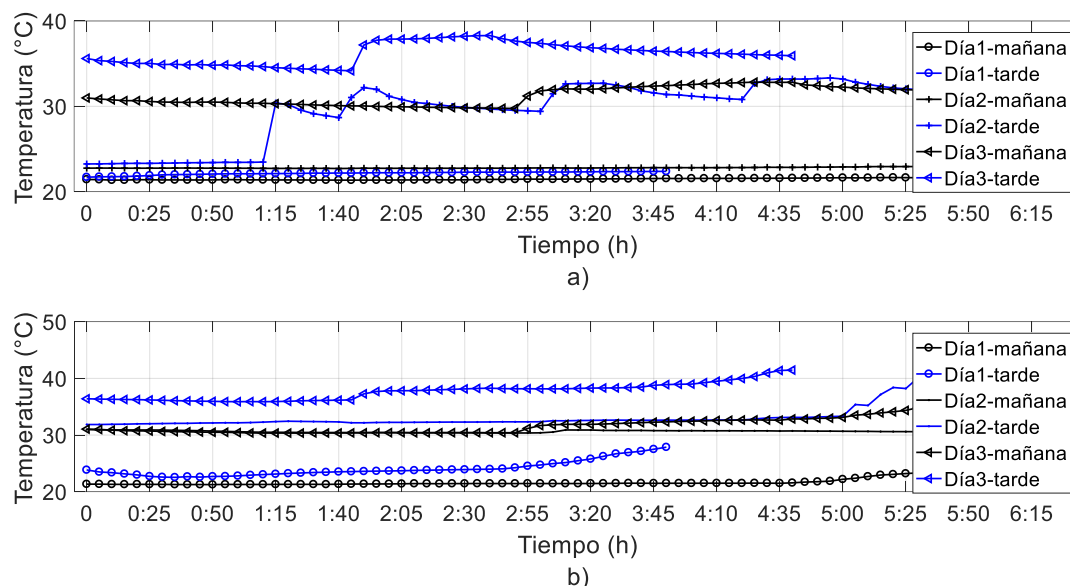


Figura 9. Comportamiento de la temperatura del agua al fondo del estanque a) y al nivel del serpentín b).

Contenido alcohólico.

El contenido alcohólico varió de 40 a 60 %, y presentó caídas debido al incremento excesivo de temperatura en la montera. Como se puede apreciar en la Figura 10 ante temperaturas bajas en el interior de la montera los niveles de alcohol eran altos, por otro lado, cuando la temperatura incrementa, los niveles de alcohol bajaban. H. F.A. Scanavini, Ceriani & Meirelles (2012) en su estudio del modelo del sistema para la obtención de la cachaca, encontraron una disminución de la concentración de etanol en el vino como consecuencia del incremento en la temperatura de ebullición del fermentado. Del mismo modo Batista & Meirelles (2011), Helena F.A. Scanavini et al. (2009) y Spaho (2017) demostraron que al inicio del fluido se tienen altos contenidos alcohólicos y en el transcurso del tiempo la tasa de flujo incrementa, disminuyendo el contenido alcohólico. Scanavini et al. (2009) también encontraron una disminución en el contenido de acetaldehído, acetato de etilo, metanol, y alcohol isoamílico con respecto del tiempo de destilado. Por otro lado, Prado-Ramírez et al. (2005) y Spaho (2017) mencionaron que para el caso del metanol suele existir altas concentraciones al final del destilado debido a su alta solubilidad en agua, sin embargo, el estudio de Scanavini et al. (2009) no se trata de un fermentado

verdadero, por lo que los autores mencionaron que el comportamiento pudo verse afectado por esta razón.

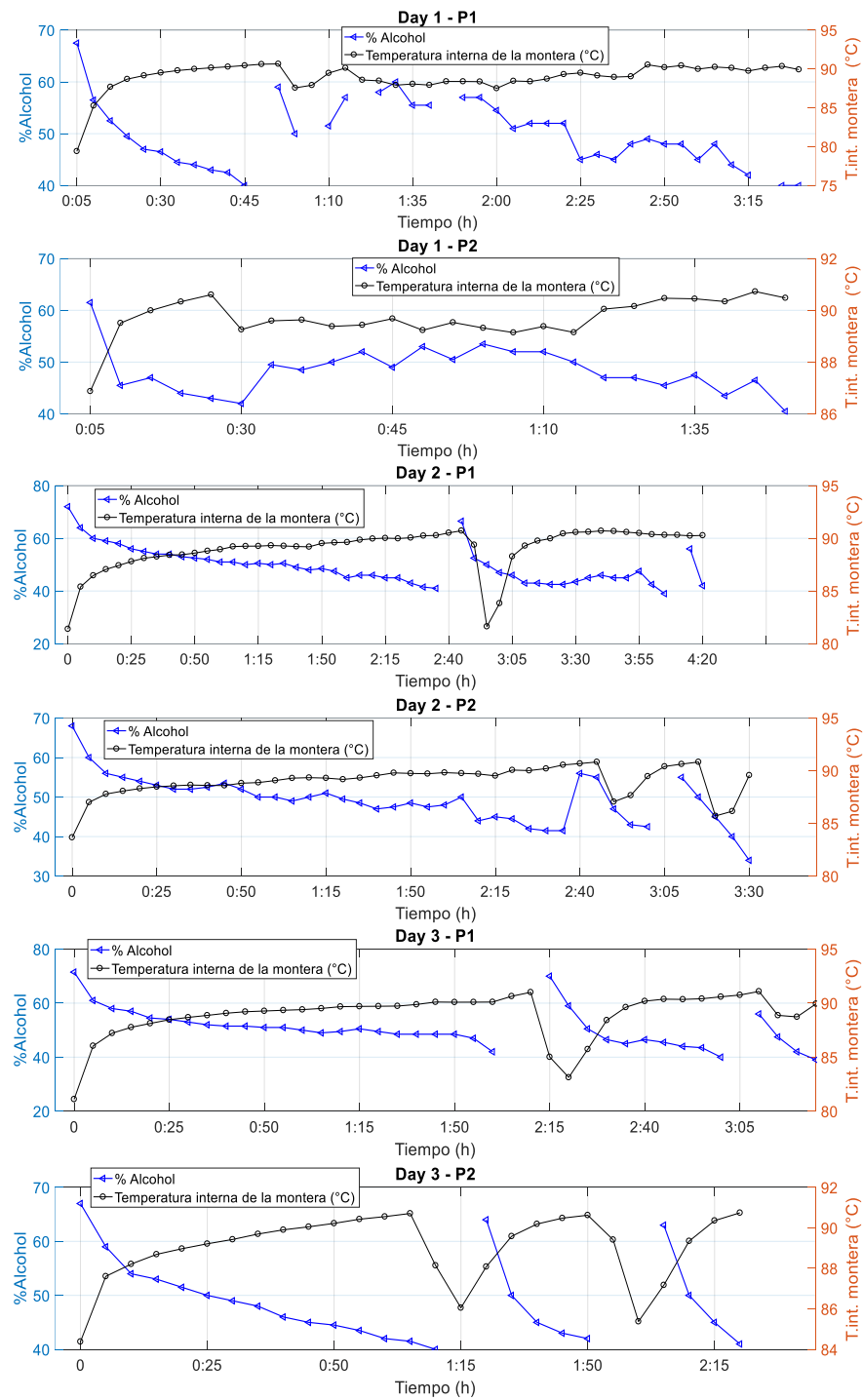


Figura 10. Relación del contenido alcohólico con la temperatura interna de la montera.

Así pues, la correlación entre la temperatura interna de la montera y el porcentaje del alcohol fue altamente significativa, con un valor de $r_{(211)} = -0.639$, $p=0.0001$, por lo que se dedujo que una menor temperatura de destilado se encuentra altamente correlacionada con un mayor porcentaje de alcohol.

b) Fase 2

En la Figura 11 se observan los datos obtenidos de la fase 2. Se obtuvo una temperatura promedio de 28.5°C para el mezcal y 40.4 °C para el horno.

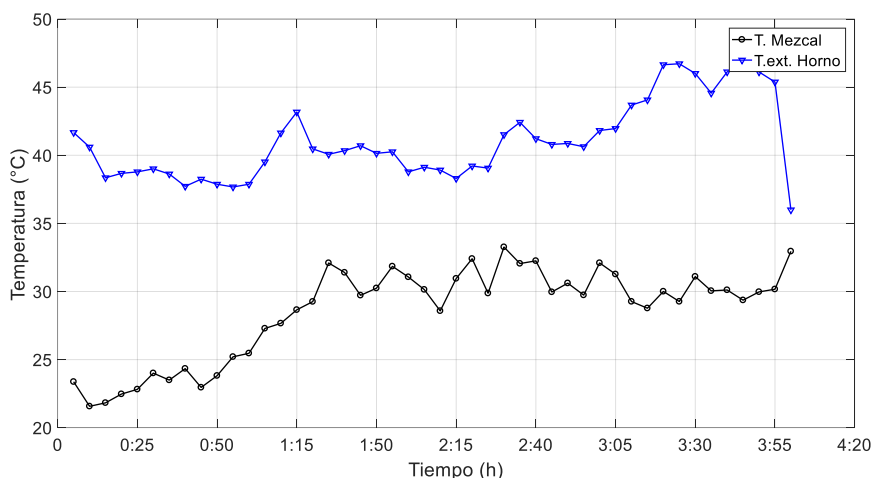


Figura 11. Comportamiento de la temperatura de salida del mezcal y temperatura externa del horno, en la segunda etapa de medición.

c) Fase 3

Se encontró que el caudal se comportó en función de la temperatura interna de la montera, pues cuando ésta incrementaba, el caudal también lo hacía y viceversa (Figura 12). Salvo por los primeros datos de la sección a) y b), se desconoce dicho comportamiento. Pese a esto, se encontró una correlación positiva significativa, con un valor de $r_{(24)} = 0.263$, $p=0.0028$. Claramente no solo importa el rendimiento que se esté teniendo, si no la calidad del fluido, por lo que se debe tener control en la temperatura interna de la olla, pues de ello dependerá el contenido alcohólico. De acuerdo con Luyben (2006) el control ideal para obtener la composición deseada en el aguardiente se puede lograr manipulando las variables de entrada, que son el caudal del fluido y la entrada de calor en la olla. Para este caso, se logra alimentando el fuego solo con lo necesario.

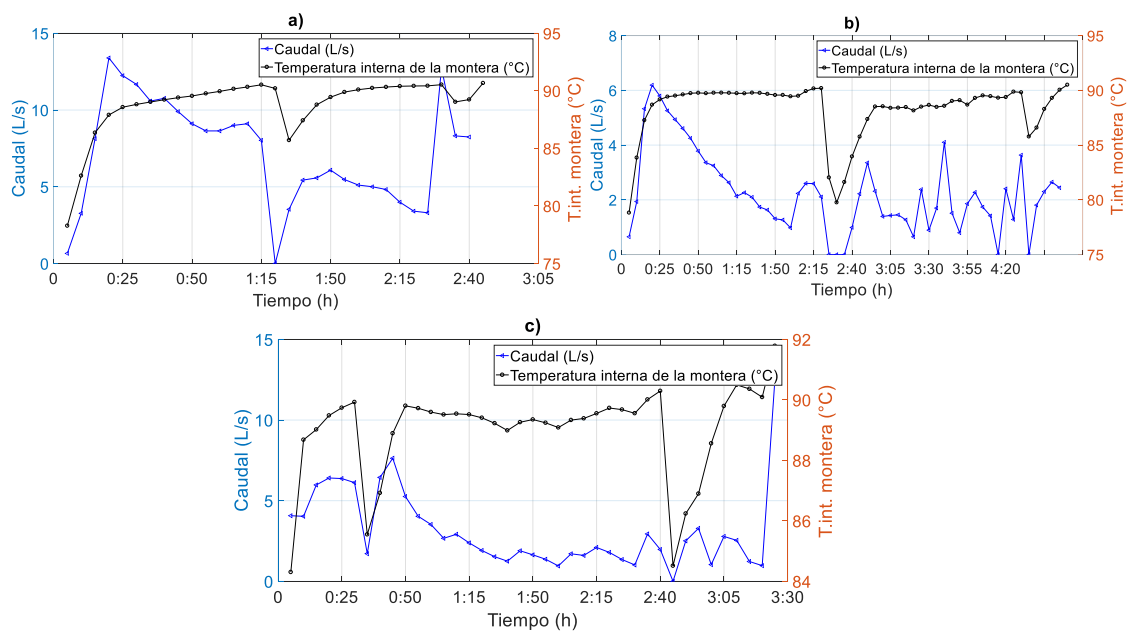


Figura 12. Caudal vs T. int. montera, a) proceso 1, b) proceso 2, c) proceso 3.

Rendimiento

En el Cuadro 4 se presenta el rendimiento obtenido en cada postura de destilación, donde se observa mayores rendimientos con la variedad de maguey espadín.

Cuadro 4. Rendimiento de mezcal según la variedad de agave.

Etapa de medición	Mezcla	N° de proceso	Volumen de destilado
			(L)
1	Ensamble bicuishe-espadín	1	5.6
		2	7.6
		3	11
		4	10.5
		5	9.5
		6	13
	F1 Espadín	1	19
		2	14
		3	20
		4	18
		5	19
		6	17
2	F2 Espadín	1	20
		2	7.5
		3	22
	F3 Espadín	1	17
		2	10.5
		3	9.5

3.3.2 Análisis térmico del sistema.

En la Figura 13 se observa cada una de las pérdidas energéticas en el sistema durante todo el proceso. Se obtuvo la pérdida energética total durante el proceso del sistema por medio del área bajo la curva, los cuales se presentan en el Cuadro 5, así también se presenta la energía necesaria para iniciar el proceso de evaporación, (ΔH_{mezcla} y ΔH_{olla}).

Cuadro 5. Energía requerida para el proceso de destilación.

Energía requerida y pérdida energética	Mañana (kJ)	% del total	Tarde (kJ)	% del total
$\dot{Q}_2$	3955.200	11.540600000	1975.320	6.434700000
$\dot{Q}_3$	1262.580	3.684000000	1212.240	3.948900000
$\dot{Q}_4$	0.016	0.000046685	0.015	0.000048863
$\dot{Q}_5$	207.250	0.604700000	187.662	0.611300000
ΔH_{mezcla}	27 824.000	81.185700000	26 359.000	85.865300000
ΔH_{olla}	1023.156	2.990000000	963.842	3.139700000
Total =	34 272.040	100.000000000	30 698.079	100.000000000

Donde:

$\Delta H_{mezcla} + \Delta H_{olla} = \text{energía requerida para iniciar la destilación.}$

$\dot{Q}_2 + \dot{Q}_3 + \dot{Q}_4 + \dot{Q}_5 = \text{pérdidas energéticas en el sistema.}$

Como se puede observar en el Cuadro 5, las pérdidas energéticas del sistema representan del 10 a 16 % de la energía total necesaria, mientras que más del 80% de la energía es necesaria para que la mezcla inicie la evaporación del fluido. De acuerdo con Rougier, Bellettre, & Luo (2021) del 100% de la energía total necesaria en su estudio de destilación de etanol, un 23% correspondió a las pérdidas que tuvo el sistema. Además, declararon que la hora del día repercute en la destilación. Tal como se demostró en esta investigación, debido a las bajas temperaturas ambientales, el sistema necesitó una mayor energía durante la mañana (Cuadro 5), aunque el rendimiento fue significativamente mayor (Cuadro 3), con respecto a la tarde.

Helena F.A. Scanavini et al. (2009) encontraron un aumento de pérdidas energéticas con respecto del tiempo en un sistema de 8 litros de capacidad, donde la pérdida máxima llegó a ser de 89 W. Mientras que, para el presente trabajo, se detectó una pérdida máxima de 348.5 W, sin embargo, se trata de un sistema de capacidad de 200 litros y consta de una mezcla bagazo-líquido, donde

alrededor de un 25% corresponde al fluido líquido, así también se observó una mayor pérdida al inicio del proceso, y para pérdidas del horno se encontraron mayores pérdidas al inicio del primer proceso y al final del segundo proceso debido a las bajas temperaturas del ambiente. De manera semejante Vargas-B., Pérez-García, García-Cuéllar, & Rivera-Solorio (2013) obtuvieron una necesidad energética que fue de 10,484 kJ/kg de etanol a 12,662 kJ/kg de etanol al 95% en una simulación en Aspen Plus. Para el presente trabajo se necesitó de 2,247.35 a 2,383.391 kJ/kg de mezcal al 47%. Dicho valor no es tan alto debido a que es destilación simple y que la concentración del alcohol en el mezcal fue de 47%. Mientras que Gil, García, & Rodríguez (2014) obtuvieron por medio de simulación en Aspen Plus, una necesidad energética de 1,526 kJ/kg de etanol anhidro en el rehervidor de un destilador por columna, siendo un valor menor debido a que se trata de un fluido de distintas características.

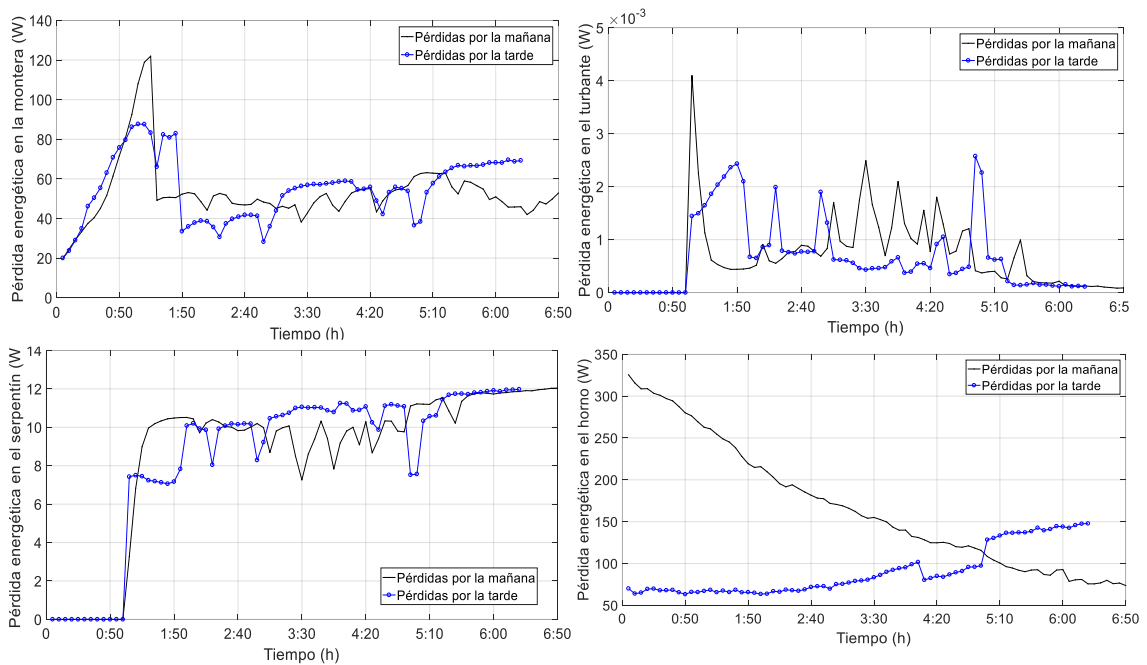


Figura 13. Pérdidas energéticas en el sistema durante el proceso.

3.4 Conclusiones

Se fabricó un equipo de monitoreo de temperatura, se tomaron mediciones en un sistema de destilación simple y se realizaron los cálculos pertinentes para obtener el consumo y pérdida de energía. Gracias al monitoreo de la temperatura en diferentes partes del sistema, se observó una alta correlación de temperatura interna de la montera con respecto a la velocidad de salida del fluido y graduación de alcohol (% Vol. Alc). A temperaturas menores de 85 °C en el interior de la montera, se logró obtener una destilación un poco lenta, aunque con altos contenidos alcohólicos. Se obtuvo una destilación continua con temperaturas de 85 °C a 89 °C con niveles de alcohol aceptables y pasado los 90°C se obtuvo un nivel alcohólico debajo del 40 %.

Las pérdidas energéticas del sistema representaron un 15 % del total de la energía necesaria para el proceso. Así también se observaron bajos rendimientos en las primeras destilaciones de la pipa de fermentación, lo cual se le atribuye a que el recipiente no sellaba herméticamente, evaporándose una buena parte de los alcoholes contenidos en el bagazo de la superficie. Aunque también se pudo deber a la falta de tiempo de fermentación. Así también se observó un mayor rendimiento en agave espadín en comparación con el agave bicuishe.

En el intento de controlar la temperatura interna de la olla no fue posible reducir el tiempo de destilación, si no por el contrario, el tiempo se prolongó un poco más, sin embargo, se logró un mayor porcentaje de alcohol en procesos largos. El cálculo térmico y las mediciones realizadas evidenciaron la importancia que tiene la temperatura interna de la montera en la destilación.

La correlación que existe entre la temperatura interna de la montera y los grados de alcohol abre pauta para que en futuros trabajos pueda realizarse la programación de un sensor suave y gracias a este, se conozca el porcentaje de alcohol en el mezcal de forma económica, sin necesidad de medirlo con un densímetro o por la prueba de la perla.

Finalmente, aun cuando la temperatura interna es difícil de controlar, se recomienda realizar pocas atizadas para evitar un incremento excesivo de la

temperatura, pues al perder el control de la temperatura interna también se pierde el control en la destilación.

3.5 Referencias

- Batista, F. R. M., & Meirelles, A. J. A. (2011). Computer simulation applied to studying continuous spirit distillation and product quality control. *Food Control*, 22(10), 1592–1603. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2011.03.015>
- Carrillo-Trueba, L.-A. (2007). Los destilados de agave en México y su denominación de origen. *Ciencias*, 87, 41–49.
- Carvalho, J., Labbe, M., Pérez-Correa, J. R., Zaror, C., & Wisniak, J. (2011). Modelling methanol recovery in wine distillation stills with packing columns. *Food Control*, 22(8), 1322–1332. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2011.02.007>
- Cengel, Y. A. (2007). *Transferencia de calor y masa. Un enfoque practico*. (M. G. Hill, Ed.), *Biotechnology Letters* (Tercera ed, Vol. 18). 2007. <https://doi.org/10.1007/BF00129346>
- Cerón-Salazar, I.-X. (2009). Separación De Metabolitos De Los Aceites Esenciales De Eucalipto Y Cidrón Por Destilación Molecular, 1–133. Retrieved from <http://www.bdigital.unal.edu.co/2869/>
- Cussler, E. L. (2012). Differential Distillation. In *Diffusion* (pp. 353–374). <https://doi.org/10.1017/cbo9780511805134.014>
- Durán-García, H. M., González-Galván, E. J., & Matadamas-Ortíz, P. (2007). Mechanization process in the production of mezcal. *Journal of Food, Agriculture and Environment*, 5(3–4), 32–35.
- Gaiser, M., Bell, G. M., Lim, A. W., Roberts, N. A., Faraday, D. B. F., Schulz, R. A., & Grob, R. (2002). Computer simulation of a continuous whisky still. *Journal of Food Engineering*, 51(1), 27–31. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(01\)00033-4](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(01)00033-4)

- Gil, I. D., García, L. C., & Rodríguez, G. (2014). SIMULATION OF ETHANOL EXTRACTIVE DISTILLATION WITH MIXED GLYCOLS AS SEPARATING AGENT, *31*(01), 259–270.
- Kim, T., & Seo, T. (2014). Numerical analysis of an ethanol-water distillation system using computational fluid dynamics (CFD). *International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering*, *14*(4), 1–6. Retrieved from http://ijens.org/Vol_14_I_04/141504-3838-IJMME-IJENS.pdf
- Kockmann, N. (2014). *History of Distillation. Distillation: Fundamentals and Principles*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-386547-2.00001-6>
- Luyben, W. L. (2006). Evaluation of criteria for selecting temperature control trays in distillation columns. *Journal of Process Control*, *16*(2), 115–134. <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2005.05.004>
- Osorio, D., Pérez-Correa, R., Belancic, A., & Agosin, E. (2004). Rigorous dynamic modeling and simulation of wine distillations. *Food Control*, *15*(7), 515–521. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2003.08.003>
- Padro-Ramírez, R. (2014). Tequila and mezcal distillation technology : Similarities and differences. *Sustainable and Integral Exploitation of Agave*.
- Prado-Ramírez, R., Gonzáles-Alvarez, V., Pelayo-Ortiz, C., Norberto Casillas, Estarrón, M., & Gómez-Hernández, H.-E. (2005). The role of distillation on the quality of tequila. *International Journal of Food Science and Technology*, *40*(7), 701–708. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2005.00983.x>
- Rage, G., Atasi, O., Wilhelmus, M. M., Hernández-Sánchez, J. F., Haut, B., Scheid, B., ... Zenit, R. (2020). Bubbles determine the amount of alcohol in Mezcal. *Scientific Reports*, *10*(1), 1–16. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-67286-x>
- Ramírez-Sorroza, M.-A. (2018). *Conductividad térmica de un panel biocompuesto empleando fibra de bagazo de agave Angustifolia Haw y Látex*. Retrieved from

[http://literatura.ciidiroaxaca.ipn.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/LITER_CIIDIROAX/447/Ramírez Sorroza%2C M. A. 2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://literatura.ciidiroaxaca.ipn.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/LITER_CIIDIROAX/447/Ramírez%20Sorroza%2C%20M.%20A.%202018.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

- Rani, A., Singh, V., & Gupta, J. R. P. (2013). Development of soft sensor for neural network based control of distillation column. *ISA Transactions*, 52(3), 438–449. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2012.12.009>
- Rougier, M., Bellettre, J., & Luo, L. (2021). An experimental study of a wine batch distillation in a copper pot still heated by gas. *Energies*, 14(11). <https://doi.org/10.3390/en14113352>
- Sacher, J., García-Llobodanin, L., López, F., Segura, H., & Pérez-Correa, J. R. (2013). Dynamic modeling and simulation of an alembic pear wine distillation. *Food and Bioproducts Processing*, 91(4), 447–456. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2013.04.001>
- Scanavini, H. F.A., Ceriani, R., & Meirelles, A. J. A. (2012). Cachaça distillation investigated on the basis of model systems. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 29(2), 429–440. <https://doi.org/10.1590/S0104-66322012000200022>
- Scanavini, Helena F.A., Ceriani, R., Cassini, C. E. B., Souza, E. L. R., Mauger Filho, F., & Meirelles, A. J. A. (2009). Cachaça production in a lab-scale alembic: Modeling and computational simulation. *Journal of Food Process Engineering*, 33(SUPPL. 1), 226–252. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.2008.00352.x>
- Spaho, N. (2017). Distillation Techniques in the Friu. In *Destillation Innovative Applications and Modeling* (Vol. Chapter 6, p. 24).
- Sumana, C., & Venkateswarlu, C. (2007). Development of a software sensor for compositions in continuous reactive distillation. *Journal of Scientific and Industrial Research*, 66(11), 898–904. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/266679384_Development_of_a_Software_Sensor_for_Compositions_in_Continuous_Reactive_Distillation

Treybal, R. E. (n.d.). Operaciones de transferencia de masa.

UNAM. (2008). Hoja de seguridad XII - Etanol, 2–5.

Valderrama, J. O., Faúndez, C. A., & Toselli, L. A. (2012). Advances on modeling and simulation of alcoholic distillation. Part 1: Thermodynamic modeling. *Food and Bioproducts Processing*, 90(4), 819–831. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2012.04.004>

Vargas-B., J.-P., Pérez-García, S. L., García-Cuéllar, A. J., & Rivera-Solorio, C. I. (2013). Thermal analysis of a solar distillation system for ethanol-water solutions. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 5(4). <https://doi.org/10.1063/1.4816499>

Woods, D. R. (2007). *Rules of Thumb in Engineering Practice*. WILEY.

4. ANEXOS

Anexo A

Sistema de monitoreo de temperatura

Se construyó un sistema de monitoreo de temperatura para un destilador de mezcal. Dicho sistema de monitoreo consta de ocho sensores de temperatura DS18B20, una pantalla LCD 4x20, un adaptador de memoria microSD Card, un módulo bluetooth para recepción de los datos en tiempo real en el teléfono móvil y una tarjeta de programación Arduino UNO.

El sensor DS18B20 fue electo gracias a su alcance de medición (Cuadro 1) y precisión, puesto que el punto de ebullición del agua es 100°C y el mezcal es una mezcla de alcohol-agua, se espera un punto de ebullición más bajo, debido a que el alcohol etílico ebulle a los 78 °C. Dicho esto, el sensor elegido cumple con lo requerido.

Cuadro 1. Especificaciones del sensor de temperatura DS18B20.

Especificación	Valor
Alimentación	3.0 V a 5.5 V
Temperatura de alcance	-55°C a +125 °C
Precisión	±0,5 °C de -10 °C a +85 °C

La conexión de los elementos del equipo se realizó según el datasheet de cada uno, se optó por emplear dos diferentes fuentes de alimentación de 5V para evitar sobrecalentar el sistema. Quedando el circuito como se observa en la Figura 1.

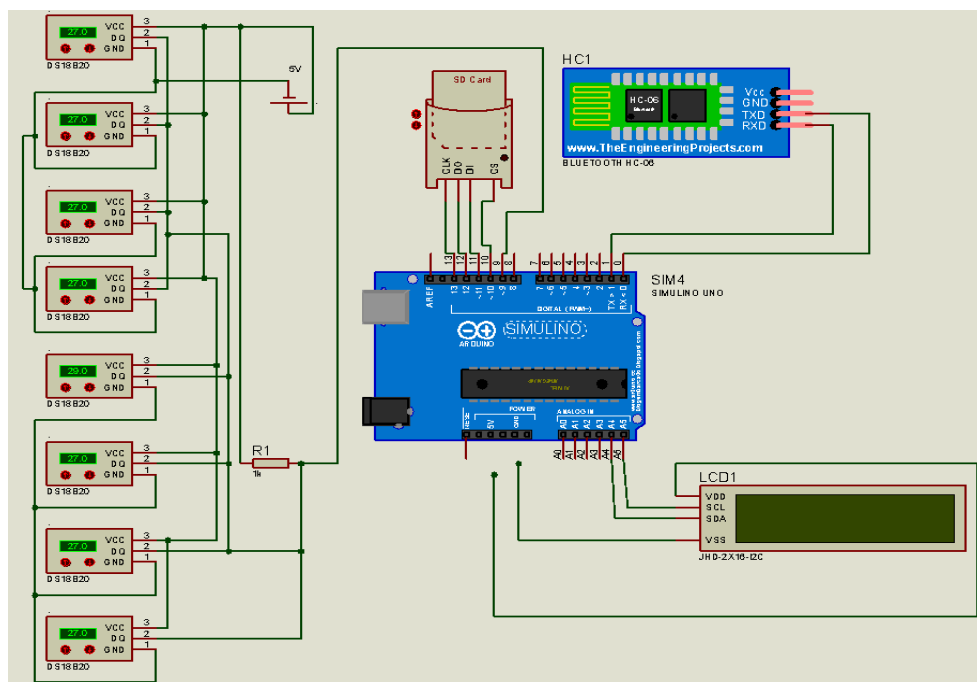


Figura 1. Circuito de conexión del sistema de monitoreo.

La programación de la tarjeta Arduino UNO se desarrolló en el entorno de programación ARDUINO, que es de carácter libre. Bajo la lógica de programación que se describe en la Figura 2.

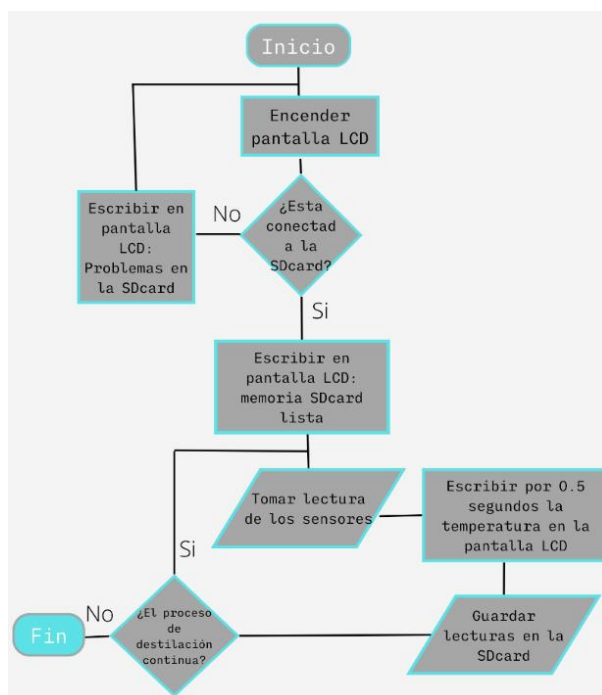


Figura 2. Lógica de programación para el sistema de monitoreo de temperatura.

Para la lectura de la información en tiempo real en el teléfono móvil se utilizó el programa App Inventor que facilitó la elaboración de una aplicación empleando el lenguaje de programación de bloques.

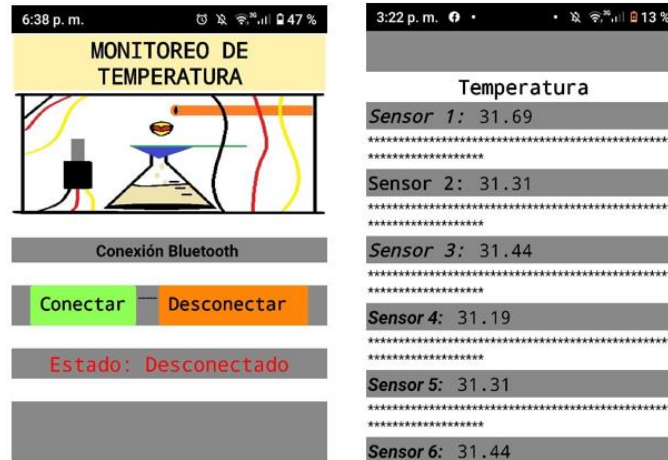


Figura 3. Aplicación en funcionamiento.

En la Figura 3 se observa la aplicación. Para su funcionamiento solo se requiere pulsar el botón conectar, en caso de haber problemas de conexión esta mandará un aviso de desconectado, en caso contrario se hará visible la información capturada por los sensores.

Ya que los sensores fueron conectados a un bus 1-Wire en común, fue necesario detectar la dirección de cada sensor, para poder asignar un número a cada uno. Una vez detectados, se realizaron tres mediciones a manera de prueba, con la mitad de los sensores en agua fría, y la otra mitad en agua caliente. Después de varias horas las lecturas tendían a estabilizarse a la temperatura ambiente. Así también se guardaron datos por 5 horas para observar el guardado de datos, el cual demostró ser eficaz.



Figura 4. Prueba del sistema de monitoreo.

Tras observar un buen comportamiento del sistema, se procedió a tomar las mediciones en campo.

Anexo B.

Fotos de la construcción del prototipo, prueba y uso en campo.

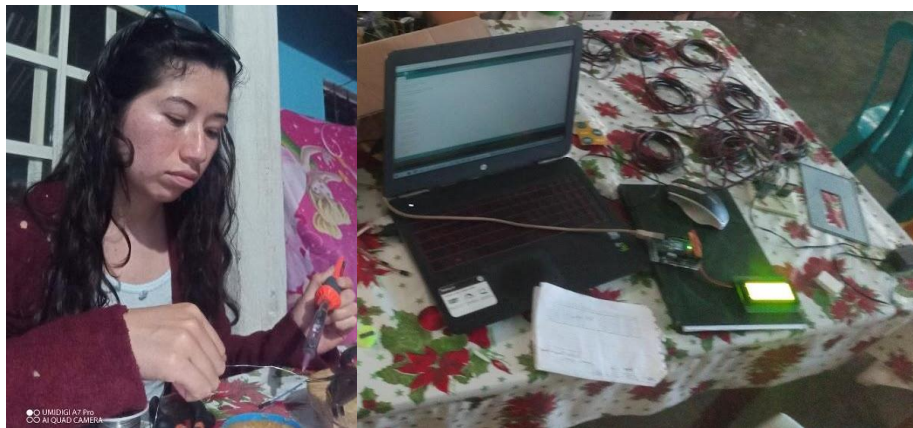


Figura 5. Construcción del sistema de monitoreo de temperatura.



Figura 6. Prueba del sistema de monitoreo.

Toma de mediciones en campo

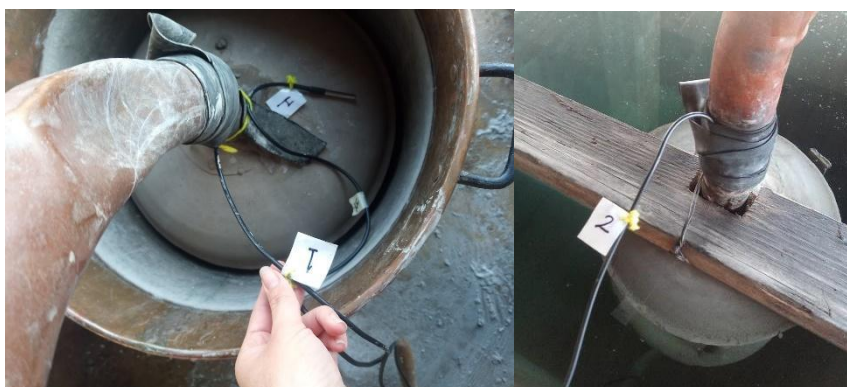


Figura 7. Instalación de sensores en el sistema de destilación.



Figura 8. Equipo de monitoreo en funcionamiento.



Figura 9. Toma de grados alcohol.

Equipo de destilación de estudio



Figura 10. Sistema de destilación en monitoreo.



Figura 11. Práctica de bagaceo.



Figura 12. Colecta de mezcal.