



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL
POSGRADO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA AGROALIMENTARIA

INSTRUMENTACIÓN DE UN DESTILADOR PARA PRODUCCIÓN DE MEZCAL ARTESANAL

TESIS

Que como requisito parcial para obtener el grado de:
MAESTRO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA AGROALIMENTARIA

Presenta:

ING. BLANCA ELENA PIOQUINTO

Bajo la supervisión de: **ARTEMIO PÉREZ LÓPEZ, DR.**



Chapingo, Estado de México, noviembre de 2025



INSTRUMENTACIÓN DE UN DESTILADOR PARA PRODUCCIÓN DE MEZCAL ARTESANAL

Tesis realizada por **Blanca Elena Pioquinto** bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobado por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

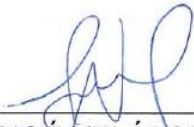
MAESTRO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA AGROALIMENTARIA

DIRECTOR



DR. ARTEMIO PÉREZ LÓPEZ

ASESOR



DR. NOÉ VELÁZQUEZ LÓPEZ

ASESOR



DRA. LANDY HENÁNDEZ RODRÍGUEZ

ASESOR



DRA. GRACIELA AVILA URIBE

CONTENIDO

LISTA DE CUADROS	v
LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE APÉNDICES	viii
AGRADECIMIENTOS	ix
DATOS BIOGRÁFICOS.....	x
RESUMEN GENERAL	xi
GENERAL ABSTRACT	xii
1. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.1 Objetivo general	3
1.2 Objetivos específicos:.....	3
1.3 Hipótesis.....	3
1.4 Organización de la tesis	3
1.5 Literatura citada	4
2. REVISIÓN DE LITERATURA	5
2.1 Orígenes prehispánicos del mezcal.....	5
2.2 Producción de agave	7
2.3 Producción de mezcal	8
2.3.1 Producción por categoría	8
2.4 Predominancia de la producción de Mezcal Artesanal en México	9
2.5 Descripción del proceso artesanal de producción de mezcal	10
2.5.1 Cosecha.....	10
2.5.2 Cocción	11
2.5.3 Molienda	11
2.5.4 Fermentación	12
2.5.5 Destilación	13
2.6 Sistema de control.....	23

2.6.1	Lógica difusa	23
2.6.2	Control difuso	24
2.7	Literatura citada	25
3.	IMPLEMENTACIÓN DE CONTROL TÉRMICO CON LÓGICA DIFUSA PARA LA RECIRCULACIÓN DE AGUA EN LA DESTILACIÓN DE MEZCAL	31
3.1	Introducción	31
3.2	Materiales y métodos	32
3.2.1	Lugar de experimentación	32
3.2.2	Ecuaciones de transferencia de calor y pérdidas energéticas	35
3.2.3	Instrumentación	37
3.2.4	Instalación del sistema de control	44
3.2.5	Propiedades fisicoquímicas	45
3.2.6	Análisis estadístico de resultados	47
3.3	Resultados y discusión	48
3.3.1	Resultado de diagnóstico inicial del proceso tradicional y modificado	48
3.3.2	Resultados del comportamiento de compuestos fisicoquímicos	55
3.4	Conclusión	74
3.5	Agradecimientos	74
3.6	Literatura citada	75
4.	CONCLUSIÓN GENERAL	77
5.	APÉNDICES	78

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Características del sensor de temperatura RTD PT100.	40
Cuadro 2. Entrada (error, °C).....	43
Cuadro 3. Salida (PWM).	43
Cuadro 4. Balance de materia y energía de la destilación tradicional.....	50
Cuadro 5. Balance de materia y energía del proceso de destilación modificada.	53
Cuadro 6. Consumo de agua entre los procesos de destilación tradicional y modificado.....	54
Cuadro 7. Requerimiento energético del proceso de destilación tradicional.....	55
Cuadro 8. Análisis de componentes principales de los parámetros fisicoquímicos del mezcal durante la destilación tradicional y modificado.....	71

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Producción de mezcal por categoría correspondiente al 2024.	9
Figura 2. Cosecha de piña.	10
Figura 3. Cocción de piñas en horno de tierra.	11
Figura 4. Molienda con mazo de madera.	12
Figura 5. Fermentación en tinas de plástico.	12
Figura 6. Esquema del proceso de destilación artesanal de mezcal.	13
Figura 7. Funciones de pertenencia para la variable temperatura.	24
Figura 8. Mapa del Estado de Oaxaca, ubicación del municipio donde se realizó la investigación.	33
Figura 9. Esquema de los elementos que conforman el sistema de destilación artesanal de mezcal.	33
Figura 10. Modelo del destilador instrumentado.	38
Figura 11. Montera adaptada para recirculación de agua y colocación de sensor.	39
Figura 12. Curva característica R-T de sensor RTD.	39
Figura 13. Gabinete de conexiones eléctricas del sistema de control.	42
Figura 14. Diagrama de flujo de los algoritmos de control.	44
Figura 15. Instalación del sistema de control.	45
Figura 16. Gabinete de control.	45
Figura 17. Diagrama de flujo del proceso de destilación tradicional.	49
Figura 18. Diagrama de flujo del proceso de destilación modificado.	52
Figura 19. Variación del contenido de alcohol en el destilado de mezcal durante los procesos de DT y DM.	58
Figura 20. Variación de la densidad del destilado durante la DT y DM.	60
Figura 21. Comportamiento de los Sólidos solubles totales en el destilado durante el proceso de DT y DM.	62

Figura 22. Comportamiento de metanol durante la DT y DM.....	64
Figura 23. Comportamiento de furfural en el destilado durante la DT y DM.	66
Figura 24. Comportamiento del flujo de mezcal durante la DT y DM.....	67
Figura 25. Diagrama de correlación de Pearson de las variables fisicoquímicos en el proceso de destilación tradicional (DT).	69
Figura 26. Diagrama de correlación de Pearson de las variables fisicoquímicos en el proceso de destilación modificado (DM).	70
Figura 27. Gráfico de PCA de correlación de las variables fisicoquímicos del destilado de mezcal.	72
Figura 28. Gráfico de PCA de las variables fisicoquímicos del destilado de mezcal por proceso de DT y DM.	73

LISTA DE APÉNDICES

Apéndice 1. Diagrama de flujo de destilación tradicional sin recirculación de agua.	78
Apéndice 2. Diagrama de flujo de proceso de destilación con recirculación de agua.	79
Apéndice 3. Diagrama eléctrico del circuito.	80
Apéndice 4. Diagrama de conexiones del prototipo.	81
Apéndice 5. Código Arduino de la unidad maestra (control y actuadores).	82
Apéndice 6. Código Arduino del módulo sensor (PT100-MAX31865).....	85

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi sincero agradecimiento a las personas e instituciones que hicieron posible esta tesis:

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por su invaluable respaldo. Su compromiso con el desarrollo de la investigación, así como sus recursos y apoyo, fueron importantes para la realización de este proyecto.

A la Dirección General de Investigación, Posgrado y Servicio (DGIPS) por su constante respaldo al desarrollo académico. Su valioso apoyo económico fue fundamental para alcanzar mis metas y concretar esta investigación.

Agradezco profundamente al Dr. Artemio Pérez López por su guía y paciencia; sus observaciones, conocimientos y apoyo en todo momento fueron fundamentales para el desarrollo de este trabajo.

Al Dr. Noé Velázquez López, por dedicar su tiempo a mi proyecto y por sus amplios conocimientos y experiencia en el tema, que enriquecieron de forma decisiva este trabajo.

A la Dra. Landy Hernández Rodríguez, por su tiempo y por aportar sus conocimientos a esta investigación.

A la Dra. Graciela Ávila Uribe, por su gran apoyo y la confianza en mi trabajo en todo momento; su experiencia me respaldó durante todo el proceso.

DATOS BIOGRÁFICOS



Datos personales

Nombre	Blanca Elena Pioquinto
Fecha de nacimiento	09 de julio de 1997
Lugar de nacimiento	Santos Reyes Yucuná, Oaxaca.
CURP	EEPB970709MOCLQL05
Profesión	Ingeniera Agroindustrial
Cédula profesional	13595934

Desarrollo académico

Preparatoria	Colegio de Bachilleres del Estado de Oaxaca, Plantel 08 Huajuapán de León.
Licenciatura	Universidad Autónoma Chapingo.

RESUMEN GENERAL

INSTRUMENTACIÓN DE UN DESTILADOR PARA PRODUCCIÓN DE MEZCAL ARTESANAL

La destilación de mezcal artesanal se realiza en alambique de cobre que requiere leña como fuente de calentamiento del mosto. Esta forma de realizar la destilación ocasiona que la temperatura del vapor que se desprende del mosto se eleve más allá del óptimo para la producción de mezcal. Para controlar esta elevación de la temperatura, en los palenques de producción de mezcal de la región de estudio, se emplea agua a chorro para enfriar el cabezal del destilador ocasionando un gasto extra de agua para la industria. En esta investigación se realizó el diseño y evaluación de un prototipo instrumentado para el control térmico mediante recirculación de agua en el alambique con la finalidad de disminuir la temperatura del vapor en el cabezal del destilador. Los resultados mostraron una disminución en 355 L por cada evento o postura de destilación, esto representa un ahorro de 1,420 L de agua por día considerando que en un palenque se realizan cuatro posturas. Este mecanismo de control también disminuyó el consumo de leña de hasta 19.4 kg por día. Las variables de porcentaje de alcohol en volumen, densidad, sólidos solubles totales, metanol se mantuvieron dentro del intervalo que sugiere la norma y el contenido de furfural se redujo ligeramente en las fracciones tardías del destilado. El mecanismo implementado representa un avance en la eficiencia hídrica y energética para la industria del mezcal.

Palabras clave: mezcal, destilación, control automático, agua, energía.

Tesis de Maestría en Ciencias. Maestría en Ciencia y Tecnología Agroalimentaria,
Universidad Autónoma Chapingo.
Autor: Blanca Elena Pioquinto.
Director de tesis: Artemio Pérez López, Dr.

GENERAL ABSTRACT

INSTRUMENTATION OF A DISTILLER FOR THE PRODUCTION OF ARTISANAL MEZCAL

The distillation of artisanal mezcal is carried out in a copper still that requires firewood as a source of heating the must. This way of distilling causes the temperature of the steam that is released from the must to rise beyond the optimal for mezcal production. To control this rise in temperature, in the mezcal production palenques of the study region, jet water is used to cool the distiller's head, causing an extra expenditure of water for the industry. In this research, the design and evaluation of an instrumented prototype for thermal control by water recirculation in the still was carried out to reduce the temperature of the steam in the distiller head. The results showed a decrease of 355 L for each distillation event or laying, this represents a saving of 1,420 L of water per day considering that four layings are performed in a palenque. This control mechanism also decreased firewood consumption of up to 19.4 kg per day. The variables of alcohol percentage by volume, density, total soluble solids, methanol remained within the range suggested by the standard and the furfural content was slightly reduced in the late fractions of the distillate. The implemented mechanism represents an advance in water and energy efficiency for the mezcal industry.

Key words: Mezcal, distillation, automatic control, water, energy.

Master of Science Thesis, Maestría en Ciencia y Tecnología Agroalimentaria.
Universidad Autónoma Chapingo.
Author: Blanca Elena Pioquinto.
Thesis advisor: Artemio Pérez López, Dr.

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

El mezcal, emblema del patrimonio cultural, histórico y económico de México, especialmente en Oaxaca, ha experimentado un marcado aumento en su demanda. Se produce por la destilación de mostos fermentados de diversas especies de *Agave* siguiendo prácticas artesanales tradicionales (Acosta-García et al., 2025).

La industria del mezcal tiene un impacto relevante en la generación de empleo, particularmente en las comunidades rurales, al abrir oportunidades económicas para pequeños productores (Meza et al., 2017). Sin embargo, pese al crecimiento del sector, una parte importante de los palenques continúa operando con métodos y tecnologías rudimentarias (Melchor-Quintas et al., 2024). La elaboración del mezcal comprende etapas clave: cosecha, horneado, molienda, fermentación y destilación, cada una con una contribución decisiva a la calidad del producto y guiada por el conocimiento empírico perfeccionado por los maestros mezcaleros. Entre ellas, la destilación es crítica porque garantiza la inocuidad y aptitud del destilado, así como su calidad para el consumo humano (Marín, 2022).

La destilación de mezcal, practicada desde el siglo XVIII, continúa dependiendo de fuentes de energía no renovables (Ascencio-San Pedro et al., 2024). Operativamente, el alambique de cobre se lleva a 78–90 °C para volatilizar y conducir los vapores hacia un condensador enfriado con agua. El alto consumo de leña y la ausencia de control preciso de temperatura pueden provocar sobrecalentamiento del mosto y cortes imprecisos, con la consecuente formación de puntas y colas enriquecidas en compuestos indeseables que deterioran la calidad e inocuidad del mezcal.

El proceso de destilación sigue realizándose en alambiques de cobre operados de forma manual y empírica. Uno de los principales retos técnicos es sostener una temperatura estable y óptima en la montera durante el proceso, ya que la ausencia de mecanismos de control del fuego en el horno provoca oscilaciones térmicas y un consumo excesivo de leña; además, el sistema de enfriamiento utiliza agua potable (Marín, 2022). La falta de monitoreo de la temperatura en la cámara de evaporación impide regular adecuadamente el aporte de calor a la olla, generando pérdidas de energía y dificultando la disipación térmica en la montera. Como consecuencia, el agua de la pileta se sobrecalienta, se prolongan los tiempos de destilación y aumenta el consumo de combustible. A su vez, el control térmico incide directamente en la composición de compuestos volátiles: se ha demostrado que la ausencia de regulación favorece incrementos de metanol, furfural y alcoholes superiores, con efectos adversos sobre la calidad e incluso la inocuidad del destilado (Cancino et al., 2022).

Para abordar esta problemática, se desarrolló un sistema de control de temperatura basado en sensores y lógica difusa. Con la implementación de este mecanismo de monitoreo de la temperatura que permita regular el suministro de leña al horno, este indicador de temperatura envía una señal a un transmisor (IBT2) para arrancar una bomba de baja capacidad para recircular agua del estanque (pileta) hacia el cabezal de la montera para regular la temperatura de separación de vapores de manera ininterrumpida ya que en la manera tradicional se hacen interrupciones por el incremento incontrolado de la temperatura; al no permitir la subida abrupta de la temperatura dentro de la cámara de evaporación, la separación y condensación de vapores se realizan cercanas a la línea de saturación de la mezcla, lo cual representa una ventaja porque no está afectando los productos aromáticos que se desprende de cada especie de maguey que se está procesando; la energía mecánica que proporciona la bomba servirá para llevar el agua para enfriar el cabezal de la montera y para devolver el agua caliente saliente del cabezal de la montera a la pileta de agua.

1.1 Objetivo general

Diseñar un sistema de control de temperatura en la montera de un destilador de producción artesanal de mezcal mediante control automático, con la finalidad de hacer más eficiente el proceso en términos de uso de agua y de energía.

1.2 Objetivos específicos:

- Realizar una evaluación in situ del rendimiento actual de un destilador artesanal de mezcal.
- Diseñar un sistema de control de temperatura para un destilador artesanal.
- Implementar el sistema de control que ajuste la temperatura de manera automática y precisa durante el proceso de destilación.
- Validar el sistema de control implementado.

1.3 Hipótesis

La implementación de un sistema de control automático de temperatura en la montera de un destilador artesanal permitirá mantener la temperatura más estable durante la destilación y mejorar la eficiencia del proceso, principalmente en el uso de agua y energía, sin afectar la calidad del mezcal obtenido.

1.4 Organización de la tesis

El presente trabajo consta de un capítulo titulado “Implementación de control térmico con lógica difusa para la recirculación de agua en la destilación de mezcal”, donde se presentan los resultados del diagnóstico inicial del proceso de destilación tradicional y del proceso modificado, en el cual se incluyen diagramas de flujo que permiten visualizar el funcionamiento de cada proceso. Posteriormente se muestran los resultados del consumo de agua y leña por postura (lote), comparando las diferencias entre ambos métodos. También se presentan los comportamientos del contenido de alcohol, la densidad, los sólidos solubles totales, el metanol y el furfural durante la destilación, así como su relación con las variaciones térmicas observadas. Finalmente, se integran las

tendencias y correlaciones entre las variables fisicoquímicas del destilado de cada proceso.

1.5 Literatura citada

- Acosta-García, E. D., Páez L., J. B., Martínez P., M. A., y Soto C., N. O. (2025). Volatile compound analysis in mezcal based on multiple extraction/concentration methods, deconvolution software, and multivariate analysis. *Food Control*, 168, 110852. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2024.110852>
- Ascencio-San Pedro, D. E., Gálvez, D. M., Mejía, E. A. R., Herrera, Á. E. L., Suriano, R. D., y Ruiz, G. B. (2024). Numerical simulation of mezcal production using a Solar distiller, Compound Parabolic Collectors (CPC's) and water as working fluid. *Journal of Engineering Research*, 4(15), 2-8. <https://doi.org/10.22533/at.ed.3174152421059>
- Cancino, H. N., Martínez, D. J., Terán, F. R., y Urbina, J. A. S. (2022). Behavior of the volatile compounds regulated by the Mexican Official Standard NOM-070-SCFI-2016 during the distillation of artisanal Mezcal. *Biotecnia*, 24(2), 20-27. <https://doi.org/10.18633/biotecnia.v24i2.1577>
- Marín C., R. (2022). *Análisis térmico de un destilador simple en el proceso de producción de mezcal tipo artesanal* (Tesis de maestría, Universidad Autónoma Chapingo, México). Consultada en: <https://repositorio.chapingo.edu.mx/items/058a8d53-c1e1-4e4e-9c46-bcc74a1e0dd1>
- Melchor-Quintas, B., Carvajal M., I., y Decimoquinto, P. (2024). Metodología de cálculo y modelado de las necesidades térmicas en el proceso de producción de una destiladora de mezcal tradicional. *Acta universitaria*. <https://doi.org/10.15174/au.2024.3880>
- Meza, D. E. E., González, G. R., Ángeles, B. E. M. (2017). Characterizing the production and organization of the mezcaleros in Matatlán, Mexico "World capital of mezcal". *Estudios Sociales Revista de Alimentación Contemporánea y Desarrollo Regional*, 27(50). <https://doi.org/10.24836/es.v27i50.465>

2. REVISIÓN DE LITERATURA

El mezcal es una bebida alcohólica destilada con profundas raíces en la cultura mexicana, definida por la Norma Oficial Mexicana NOM-070-SCFI-2016 como un producto 100% de maguey (agave), obtenido de la destilación de mostos fermentados extraídos de las cabezas maduras y cocidas de esta planta (Secretaría de Economía, 2017); su perfil sensorial varía según la especie de agave y el proceso de elaboración.

2.1 Orígenes prehispánicos del mezcal

El origen del mezcal se ancla en tiempos prehispánicos: los pueblos zapotecos ya aprovechaban el aguamiel del agave en ceremonias y eventos reservados a las élites políticas y religiosas. Con la llegada de los españoles en el siglo XVI, el conocimiento local sobre el maguey se combinó con técnicas de destilación recién introducidas, dando forma a la bebida en el sentido en que hoy la entendemos. A partir de entonces, su elaboración se expandió a distintas regiones del país, entre ellas Durango, San Luis Potosí, Guerrero, Jalisco, Zacatecas y Oaxaca (Arellano-Plaza et al., 2022; Pérez-Akaki et al., 2021).

Diversas investigaciones han cuestionado la versión tradicional sobre el origen de la destilación en México. Algunos hallazgos, como los de MacNeish en el Valle de Tehuacán, Puebla, y estudios posteriores, plantean la posibilidad de que métodos rudimentarios de destilación de agave ya se practicaran en el México prehispánico. Se han descubierto hornos y artefactos cerámicos que podrían indicar un proceso de cocción y condensación de los jugos de agave, lo que adelantaría el nacimiento de lo que hoy conocemos como mezcal (Delgado-Lemus et al., 2014)

Sin embargo, es ampliamente aceptado que la destilación a gran escala y con alambiques, tal como se conoce hoy, se consolidó con la influencia española (Colunga-GarcíaMarín y Zizumbo-Villarreal, 2007).

La llegada de los españoles en el siglo XVI marcó un cambio en la historia de las bebidas de agave, ya que introdujeron la tecnología de la destilación, una técnica que habían adquirido de los moros durante siglos de interacción cultural en la Península Ibérica. Antes de 1521, el pulque era la bebida alcohólica predominante en Mesoamérica (Correa-Ascencio et al., 2014). Sin embargo, a finales del siglo XVI cuando la combinación de la materia prima local (el agave) y la técnica foránea (la destilación) dio origen al aguardiente de agave, el precursor directo del mezcal (Morales-Rodríguez, 2008).

Durante la época colonial, el agave comenzó a emplearse no solo para la elaboración de bebidas de mayor graduación, sino que su uso también se convirtió en una estrategia económica y de control social para la Real Hacienda. La disponibilidad de un producto embriagante, accesible y abundante permitió a los colonizadores generar ingresos y ejercer cierta influencia sobre la población indígena (Chimal, 2023; García-Garza, 2021). Así, la producción de aguardiente de agave se expandió rápidamente por diversas regiones donde el agave proliferaba, adoptando diferentes nombres según el lugar: "vino de agave" o "vino de mezcal", evolucionando posteriormente a denominaciones más específicas como tequila en Jalisco, bacanora en Sonora, sotol en Chihuahua y, por supuesto, mezcal en Oaxaca y otras regiones (Zizumbo-Villarreal y Colunga-GarcíaMarín, 2008).

La expansión de la producción de mezcal en Oaxaca tuvo sus inicios en regiones geográficas privilegiadas para el cultivo de agave y la elaboración, como la Cañada Quiatoni-Narro y los distritos de Yautepec, Tlacolula, Ocotlán, Miahuatlán, Ejutla y Sola de Vega. Inicialmente, el proceso y la producción estaban bajo el control de los hacendados. Sin embargo, con el tiempo, las comunidades locales, los "maestros mezcaleros", adoptaron y perfeccionaron la técnica, adaptándola con materiales y herramientas disponibles en su entorno,

como ollas de barro superpuestas (Reyna, 2021). A pesar de las prohibiciones impuestas por las autoridades coloniales sobre la producción de aguardiente, el mezcal continuó elaborándose en secreto, en palenques remotos y escondidos, lo que contribuyó a preservar sus métodos artesanales (De León-Meza, 2015; González-Mireles, 2022).

El periodo entre la Independencia y el Porfiriato vio una expansión significativa del cultivo de *Agave salmiana* (conocido como maguey pulquero), lo que favoreció la disminución del consumo de bebidas alcohólicas importadas y generó ingresos importantes para la nación (Bautista, 2011; Hernández-Fabián, 2022; Valadez-Montes, 2014).

A finales del siglo XIX, bajo el gobierno de Porfirio Díaz, la producción de tequila en Jalisco experimentó una modernización tecnológica notable, con la implementación de molinos mecánicos, prensas de alta capacidad y destiladores de acción continua. Sin embargo, estos avances industriales no se aplicaron de manera generalizada a la producción de mezcal en Oaxaca, lo que permitió que sus métodos tradicionales y artesanales se mantuvieran prácticamente inalterados, convirtiéndose en un sello distintivo de su identidad y calidad (Arellano-Plaza et al., 2022; García-Garza, 2021).

Hoy en día, Oaxaca es reconocido mundialmente por la calidad de su mezcal, caracterizado por su aroma y sabor únicos, resultado de un proceso artesanal que ha perdurado a lo largo del tiempo (COMERCAM, 2025).

2.2 Producción de agave

La producción global de agave alcanzó las 42,221.86 toneladas, cultivadas en una extensión de 58,242 hectáreas en el 2023. Esto sitúa el rendimiento promedio en 0.7 toneladas por hectárea, de acuerdo con los datos proporcionados por FAOSTAT (2023).

En 2023 Colombia fue el principal productor de agave en el mundo con 14,878.1 toneladas, seguida de Cuba con 3.608,71 t, Ecuador con 4.541,73 t, Filipinas

produjo 3.995,95 t, Nicaragua contribuyó con 5.357,76 t, mientras que México con 6,137.27 toneladas (Rawat et al., 2025).

México cuenta con 223 de las 273 especies de agave que existen en el mundo, actualmente solo unos 12 a 15 son magueyes mezcaleros (SEMARNAT, 2019). Se producen cerca de 400 mil toneladas de agave para la producción de mezcal.

De acuerdo con el SIAP (2024) el estado de Jalisco fue el principal productor de agave en México con 1,268,502.41 toneladas (49.20 %), seguido por Guanajuato con 451,609.50 toneladas (17.52 %), Michoacán con 316,173.55 toneladas (12.26 %) y Oaxaca con 256,549.04 toneladas (9.95%), por lo que estas 4 entidades representaron el 88.94 % de la producción nacional.

2.3 Producción de mezcal

En México hay nueve Estados productores de mezcal: Oaxaca (90.70 %), Durango (2.52 %), Michoacán (2.32 %), Puebla (1.80 %), Guerrero (0.83 %), San Luis Potosí (0.82 %), Zacatecas (0.64 %), Tamaulipas (0.36 %) y Guanajuato (0.01 %). Todos ellos cuentan con la denominación de origen del producto (COMERCAM, 2025). Oaxaca, como el principal productor, contribuye con el 90.70 % de la producción total de mezcal y se posiciona como el principal exportador. Además, envasa el 74.97 % del mezcal a nivel nacional y el 75.60 % a nivel internacional. Este sector no solo impulsa la economía local, generando 55,000 empleos directos, sino que también tiene un impacto significativo con más de 210,000 empleos indirectos (COMERCAM, 2025).

2.3.1 Producción por categoría

Según el informe estadístico de la COMERCAM (2025), en 2024 se produjeron 11,362,436 litros de mezcal a 45 % Alc. Vol. Dentro de esta cifra, el Mezcal Artesanal se posicionó como la categoría predominante, representando un 97.01 % del total (Figura 1). Este dato resalta la fuerte preferencia por los métodos tradicionales de producción y el valor cultural que esta categoría tiene dentro de la industria mezcalera.

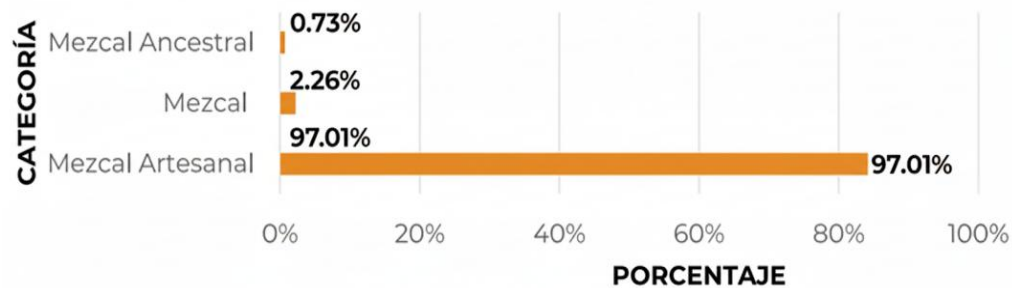


Figura 1. Producción de mezcal por categoría correspondiente al 2024.

Fuente: (COMERCAM, 2025).

2.4 Predominancia de la producción de Mezcal Artesanal en México

La NOM-070-SCFI-2016 clasifica el producto en tres categorías (Mezcal ancestral, Mezcal Artesanal y Mezcal) según equipos y métodos de cocción, molienda, fermentación y destilación, y la gran mayoría de palenques tradicionales encaja en la categoría Artesanal (hornos de pozo o mampostería, tahona u otras moliendas no industriales, fermentación en madera/mampostería y destilación en alambique de cobre), por lo que al certificarse se registran mayormente en ese rubro (Secretaría de economía, 2017).

La estructura productiva del sector sigue dominada por unidades de pequeña escala con organización familiar o comunitaria y conocimientos transmitidos a través de generaciones. En Matatlán y otras regiones operan con prácticas artesanales y limitan la transición hacia esquemas más mecanizados sin alterar identidades y conocimientos locales (Meza et al., 2017). Además, la literatura reciente señala que el sistema mezcalero enfrenta problemas para escalar sin sacrificar tradición, territorio y prácticas culturales, lo que refuerza la persistencia de procesos artesanales como estrategia de viabilidad económica, social y ambiental (Arellano-Plaza et al., 2022).

El mercado nacional e internacional premia autenticidad, origen y métodos tradicionales, manteniendo la categoría Artesanal como la más producida y comercializada cada año. Este panorama sugiere que la actual estructura

regulatoria, productiva y de mercado continuará sosteniendo la alta participación del Mezcal Artesanal en el total de litros certificados en México.

2.5 Descripción del proceso artesanal de producción de mezcal

La producción del mezcal está influenciada por diversos factores que determinan su carácter único. Estos incluyen la selección de la especie de agave, su cultivo y grado de madurez, así como el método de cocción, que puede realizarse en hornos de tierra o autoclaves (Ávila-Reyes et al., 2025). También influyen la molienda, ya sea manual o mecánica, las condiciones de fermentación con levaduras naturales (Becerra-Lucio et al., 2022), la destilación en alambiques de cobre, el proceso de añejamiento y las características geográficas del área de cultivo.

Según la revisión de diversos autores (Caballero et al., 2012; Marín, 2022), los pasos de este proceso se describen de la siguiente manera:

2.5.1 Cosecha

Una vez que el agave alcanza la madurez, se procede a la cosecha como se ilustra en la figura 2: consiste en cortar las hojas externas (pencas) para dejar únicamente la "piña" o cabeza del agave y posteriormente transportarlas al lugar donde se procesarán. En promedio, una piña se cosecha a los ocho años (Rieger, 2025).



Figura 2. Cosecha de piña.

2.5.2 Cocción

Las piñas se cuecen en hornos cónicos excavados en tierra y revestidos con piedra, donde el calor de la leña y las rocas calientes ablanda las fibras y, sobre todo, hidroliza los fructanos del agave en azúcares fermentables (principalmente fructosa), preparando el sustrato para la fermentación y aportando notas sensoriales (Martínez-Estrada et al., 2024). En la figura 3 se observa cómo se cubre el horno con bagazo y tierra, para conservar el calor, la cocción suele durar entre 3 y 4 días, según el tamaño de la piña y la práctica del palenque (Ávila-Reyes et al., 2025; Espinoza-Martínez et al., 2023; Rieger, 2025).



Figura 3. Cocción de piñas en horno de tierra.

2.5.3 Molienda

Una vez cocidas las piñas de agave, se retiran del horno y se trasladan al lugar donde se enfrían y posteriormente se muelen. Se realiza una selección previa a la molienda, esto es, con la finalidad de separar las partes o pencas de la piña que hayan sido quemadas en la cocción, también se desechan los cogollos del agave, los cuales son pencas tiernas y pequeñas que no contienen azúcares en su interior. La molienda, es el triturado o desgarre de las fibras del agave con la finalidad de extraerle sus y mieles; esta operación es realizada de manera manual con garrotes de madera como se muestra en la figura 4, 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, (Ávila-Reyes et al., 2025; Espinoza-Martínez et al., 2023).



Figura 4. Molienda con mazo de madera.

2.5.4 Fermentación

La fermentación es un proceso complejo en el que interactúan diversos tipos de levaduras, bacterias y otros microorganismos y su presencia depende de varios factores (localización geográfica, condiciones climáticas, variedad, madurez, tipo de agave), que definen el aroma y sabor de la bebida se transfieren a las tinas de fermentación, donde ocurre el proceso natural (Ávila-Reyes et al., 2025). En la figura 5 se observa cómo se realiza en tinas de plástico y tapado con hule, bajo un techo de lámina (Becerra-Lucio et al., 2022; Espinoza-Martínez et al., 2023).



Figura 5. Fermentación en tinas de plástico.

2.5.5 Destilación

La figura 6 muestra el proceso de destilación del mezcal. El mosto fermentado se coloca en un alambique de cobre y se somete a calentamiento para la evaporación de los compuestos más volátiles. Los vapores generados ascienden hacia la montera y son conducidos al sistema de enfriamiento, donde se condensan y retornan a fase líquida. Este proceso de evaporación–condensación permite obtener un destilado más puro y concentrado. Inicialmente predominan los vapores de etanol que, al enfriarse, se condensan y forman el mezcal destilado (Ávila-Reyes et al., 2025; Lazo et al., 2025).

El alambique facilita esta transformación gracias a su diseño en cobre, debido a su alta conductividad térmica, de tal forma que facilita la transferencia de calor calentándose y enfriándose fácilmente, alcanzando así la temperatura apropiada de separación (Correa-Ascencio et al., 2014; Lazo et al., 2025).

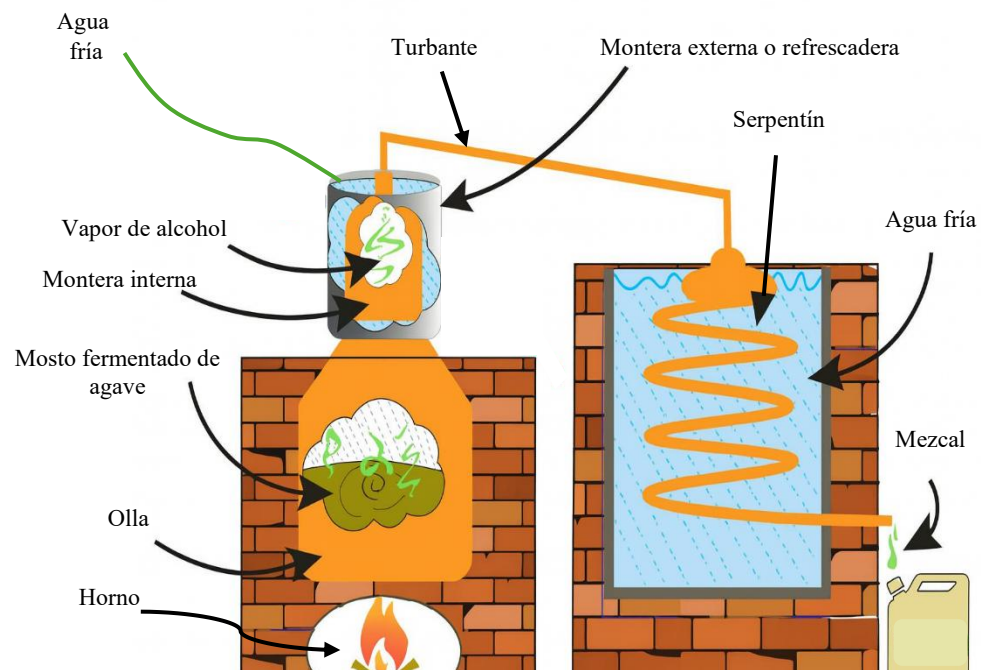


Figura 6. Esquema del proceso de destilación artesanal de mezcal.

Fuente: Modificado de (Mezcal mal bien, 2025).

Calentamiento y regulación de calor en la destilación de mezcal del proceso artesanal

El control de la temperatura es importante para garantizar una destilación eficiente. El proceso de destilación se puede dividir en dos etapas principales: primera destilación y refinación (segunda destilación).

Para iniciar la destilación, el horno se calienta, de manera tradicional con leña, para que el mosto comience a evaporarse; generalmente, tarda alrededor de una hora tras encender el horno para obtener un chorro fino de alcohol en los galones. Sin embargo, es necesario regular la temperatura para evitar efectos adversos:

Una temperatura demasiado alta, provoca un burbujeo excesivo y la formación de espuma en el mosto. Esto puede arrastrar contaminantes no deseados, como el tepache hacia el destilado, lo que afecta su pureza y sabor. Además, el sobrecalentamiento puede reducir la eficiencia del condensador al calentar excesivamente el agua de enfriamiento, y puede arrastrar residuos (Heller et al., 2022). Sí, por el contrario, la temperatura es demasiado baja, el flujo de destilado se vuelve irregular o puede detenerse por completo. La temperatura ideal oscila entre 85 °C y 89 °C, se obtiene una destilación continua con niveles adecuados de alcohol (Marín, 2022). En este rango, se obtiene un destilado con una concentración de alcohol adecuada. Si la temperatura supera los 90 °C, el contenido alcohólico desciende significativamente, por debajo del 40 %.

El control térmico de la destilación se lleva a cabo añadiendo o retirando leños, o aplicando agua sobre ellos para reducir su temperatura, y realizando refrescadas a la montera del destilador, que consiste en aplicar agua para regular la temperatura interior de la olla. Estas acciones influyen directamente en el tamaño del chorro, que debe mantenerse delgado y constante (Marín, 2022).

La falta de un gradiente térmico adecuado en el proceso de destilación artesanal genera fluctuaciones indeseadas en la separación de los compuestos volátiles. Estas variaciones afectan la composición del destilado, especialmente en la

fracción de shishe (corazón), que debe cumplir con los estándares establecidos en la NOM-070-SCFI-2016.

Primera destilación

(Solís-Núñez y Trujillo-Valdivieso, 2008) reportan que, se recolectan tres garrafones por lote u olla, cada uno con diferente porcentaje de alcohol: el primero, es la fracción punta que tiene una alta graduación alcohólica de entre 80° y 90° G.L. (Gay-Lussac) (60% v/v), y los dos siguientes contienen el shishe, destilado de la primera pasada, también llamado “ordinario”, con una graduación aproximada de 20°–40° G.L. Por su parte, Cancino et al (2017) documentan que, en la primera destilación, se colecta en corrido un único destilado sin cortes, denominado shishe u ordinario; el volumen lo define el productor conforme decrece el grado alcohólico del chorro a lo largo de la corrida (45 % v/v al inicio hasta 12–13 % v/v), juntándose todo como un solo lote de ordinario. Todo este lote pasa a una segunda destilación o refinación, donde se realizan los cortes de punta, cordón y shishe (también llamados cabeza, corazón y cola) para ajustar compuestos volátiles y cumplir con la NOM-070 (35–55 % v/v).

Segunda destilación (Refinación)

La refinación del mezcal es un proceso esencial para alcanzar la graduación alcohólica adecuada antes del envasado. Se parte del mezcal obtenido en la primera destilación, cuyo contenido alcohólico aún es inferior al requerido, y se somete a una segunda destilación para concentrarlo.

Se emplea el mismo equipo de la fase anterior y se sigue un procedimiento similar con algunas variaciones. Primero, la olla se llena de shishe, el producto obtenido en la primera destilación. Luego, se controla el calor de manera más estricta, ya que no hay barreras que regulen la salida de los vapores, lo que aumenta el riesgo de pérdidas de alcohol.

La graduación alcohólica varía desde los 43° G.L. hasta la obtención de agua destilada, conocida como "cola". Finalmente, se vacía la olla abriendo su salida lateral inferior, una etapa única en la que no hay cambios en el contenido. El

refinamiento permite mejorar la calidad del destilado y obtener un mezcal con las características óptimas para su comercialización (Solís-Núñez y Trujillo-Valdivieso, 2008).

De acuerdo con Cancino et al. (2022) durante la segunda destilación el destilado se fracciona en cabezas, corazón y colas. En mediciones de campo sobre un lote artesanal (cobre, doble destilación), las cabezas se colectaron entre 77.71–74.30 % v/v de etanol; el corazón se siguió hasta 28.83 % v/v y las colas hasta 14.44 % v/v. En estos cortes, los alcoholes superiores y ésteres predominan al inicio de la corrida (cabezas), mientras que furfural y metanol se incrementan hacia el final (colas).

Después, el corazón se ajusta para cumplir con la NOM-070-SCFI-2016, que pide 35–55 % v/v a 20 °C; en práctica de palenques esto se logra diluyendo con agua potable y, en algunos casos, cantidades acotadas de cabezas y/o colas para alcanzar el grado objetivo sin rebasar límites de compuestos regulados. De forma general, las revisiones técnicas describen que la segunda destilación deja el destilado en el entorno de 50–60 % v/v antes del ajuste final, tras haber recortado cabezas y colas (Arellano-Plaza et al., 2022).

Pérdidas energéticas del sistema de destilación de producción artesanal

El calentamiento del alambique concentra la mayor demanda energética en la producción de mezcal artesanal. Este proceso, que se realiza a fuego directo, es altamente ineficiente, lo que genera significativas pérdidas energéticas. La destilación es la etapa más intensiva en energía y la principal fuente de ineficiencia y emisiones del proceso.

La mayor parte de la energía utilizada en la producción de mezcal artesanal, hasta un 87%, proviene de la combustión de leña durante la destilación (Ruiz-Camou et al., 2023). Este elevado consumo de combustible representa la principal fuente de pérdidas energéticas y emisiones. Específicamente, se utilizan aproximadamente 50 kg de madera por carga del alambique, lo que representa un costo económico y ambiental considerable. Díaz-Barajas et al. (2024), indican

un consumo de hasta 360 kg por ciclo de destilación, lo que resalta la variabilidad y la falta de estandarización del proceso tradicional.

La biomasa es el principal insumo energético del proceso artesanal de mezcal: estudios reportan consumos de 6–8 kg de leña por litro de mezcal y, en análisis por botella, alrededor de 5.6 kg de leña por unidad funcional (botella) en escenarios típicos; la variabilidad entre talleres es alta. Estas cifras reflejan una ineficiencia de combustión y falta de estandarización del calentamiento (FAO, 2019; Melchor-Quintas et al., 2024).

Alambiques de cobre calentados a fuego directo, con poco o nulo aislamiento en caldera/montera/serpentín, pierden calor por convección y radiación al ambiente, obligando a quemar más leña para mantener el hervido. Esta característica del proceso artesanal está ampliamente descrita en la literatura técnica sobre mezcal (Arellano-Plaza et al., 2022).

Cuando el agua del serpentín se sobrecalienta arriba de 50 °C, se tira al ambiente, incrementando la carga de combustible para sostener el proceso de evaporación-condensación (Marín, 2022).

Cada litro de mezcal genera 7–11 L de vinaza y su temperatura de descarga suele ser mayor a 70 °C; ese calor residual se disipa sin recuperación (Díaz-Barajas et al., 2024).

Esta ineficiencia no solo representa un problema económico para los productores, sino también un grave impacto ambiental debido a la deforestación y la contribución a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), como el dióxido de carbono y el metano (FAO, 2019; Cancino et al., 2022).

La falta de un sistema de control de temperatura automático o de un aislamiento adecuado en los alambiques tradicionales provoca una gran pérdida de calor al ambiente, lo que prolonga el tiempo de destilación y aumenta la necesidad de combustible. Además, el calor residual de la destilación y la disposición de vinaza caliente con temperaturas de descarga de 70–90 °C son ejemplos de pérdidas energéticas directas al ambiente (Maciel-Martínez et al., 2020).

La baja eficiencia térmica de hornos y alambiques tradicionales provoca que gran parte del calor generado se disipa y no se transfiere de manera eficiente al mosto; los Análisis de Ciclo de Vida (ACV) ubican a la etapa de proceso, incluyendo la destilación como la de mayor demanda energética, y muestran que la leña usada en destilación domina los impactos de esa fase; esta etapa aportó 59.6 % del impacto total y la madera en destilación contribuyó 94 % del impacto, con una demanda energética total de 163.8 MJ por botella de 750 mL (Maciel-Martínez et al., 2020). A su vez, Manilla (2023) indica en un ACV de la producción artesanal de mezcal, las etapas de cocimiento y destilación aportan 97 % del Potencial de Calentamiento Global (PCG) total del proceso; por etapa, el cocimiento representa 57 % y la destilación 42 %.

Consumo y manejo del agua en la producción de mezcal

El agua es un recurso vital en la destilación de mezcal, utilizado principalmente para la dilución del destilado y, de manera crítica, en el sistema de condensación del alambique. En el proceso artesanal, el condensador (serpentín) se enfría con agua que, a menudo, no se recircula eficientemente. El análisis térmico de estos sistemas ha demostrado que la falta de un control preciso de la temperatura del agua de enfriamiento reduce la eficiencia de condensación, generando pérdidas de energía y una mayor demanda de agua fresca (Caballero-Caballero et al., 2012).

El manejo manual del agua en el sistema de enfriamiento también puede comprometer la calidad del mezcal. La variabilidad en la temperatura del agua afecta la separación de los compuestos volátiles, lo que puede influir en la concentración de alcohol y la presencia de sustancias no deseadas en el producto final. Por lo tanto, la optimización del uso del agua a través de sistemas de recirculación o control automatizado es fundamental para mejorar la sostenibilidad del proceso y la consistencia del producto (Arellano-Plaza et al., 2022).

Compuestos volátiles en la destilación de mezcal artesanal

El mezcal es una bebida tradicional que contiene compuestos volátiles y no volátiles que determinan su sabor y aroma. El metanol y otros compuestos volátiles se consideran tóxicos, por eso deben ser regulados (Caballero-Caballero et al., 2012).

Los compuestos volátiles son las moléculas que, con el calor de la destilación, pasan a la fase de vapor y se arrastran al destilado, definiendo su aroma y sabor. Incluyen alcoholes (etanol y superiores), ésteres, aldehídos, terpenos y furfurales. Su perfil depende de la especie y madurez del agave, de las condiciones de fermentación y de cómo se realiza la destilación (Ávila-Reyes et al., 2025; Cancino et al., 2022).

Sánchez et al. (2025) analizaron nueve mezcales artesanales de agaves silvestres de Oaxaca mediante SPME-GC-MS e identificaron 82 compuestos, destacando ésteres, terpenos y alcoholes superiores como grupos dominantes. Proponen un set de marcadores químicos (ocho compuestos clave) para trazabilidad y control de calidad, mostrando cómo la especie y el origen estructuran el perfil volátil incluso dentro de prácticas artesanales.

Fraccionamiento y presencia de compuestos tóxicos en el destilado

Durante la destilación de mezcal artesanal, los compuestos volátiles se distribuyen entre cabezas, corazón y colas en función de su punto de ebullición, solubilidad relativa en etanol-agua y la evolución del grado alcohólico a lo largo del proceso, además del tipo de equipo empleado. Este principio explica por qué ciertos compuestos se concentran preferentemente en cortes iniciales y otros en fracciones tardías (Cancino et al., 2022).

En las cabezas se concentran principalmente los compuestos de bajo punto de ebullición y mayor volatilidad, como aldehídos (acetaldehído), ésteres ligeros (acetato de etilo, metil acetato) y una porción importante de alcoholes superiores. Estos compuestos son potencialmente indeseables o tóxicos y aportan aromas

agresivos cuando exceden ciertos límites (Sánchez et al., 2025). Según datos de campo reportados por Cancino et al. (2022) el primer litro de la fracción cabeza presentó en promedio aldehídos 73-37 mg/100 mL a.a., ésteres 1732 mg/100 mL a.a. y alcoholes superiores 421 mg/100 mL a.a.; en contraste, furfural fue bajo y metanol ya es detectable pero no máximo.

En la fracción de colas predominan compuestos de alto punto de ebullición y mayor solubilidad en agua, entre ellos furfural, lactato de etilo, β -feniletanol y un metanol que tiende a aumentar. Si estas porciones se arrastran hacia el corazón por cortes tardíos, deterioran el perfil sensorial (notas quemadas) y pueden comprometer la seguridad del destilado; por ello, los cortes deben ser precisos para evitar su ingreso al corazón (Cancino et al., 2022).

Los cortes de la destilación dependen de varios factores: la especie y madurez del agave, condiciones de fermentación, el tipo de combustible y la experiencia del maestro mezcalero. Según estos factores, cambian las cantidades de alcoholes superiores, ésteres y terpenos en cada fracción. Por eso conviene usar criterios objetivos, por ejemplo, la graduación alcohólica del flujo de mezcal para hacer cortes consistentes (Sánchez et al., 2025; Vera-Guzmán et al., 2018).

La concentración de alcohol es mayor en las primeras fracciones (“cabezas”) y disminuye progresivamente a medida que avanza la destilación. El alcohol se mide típicamente por densimetría y su mayor proporción se encuentra en los primeros cortes (Balcerek et al., 2017; Hatta-Sakoda et al., 2024).

El etanol tiene una densidad menor (aprox. 0,789 g/mL a 20°C) que el agua (1,000 g/mL a 20°C). Por lo tanto, cuando la fracción de alcohol es alta (como en las primeras fracciones de la destilación), la densidad del destilado es baja. A medida que avanza la destilación y el contenido de alcohol disminuye, la proporción de agua y otros compuestos más densos aumenta, elevando la densidad del líquido.

El furfural aparece principalmente en las fracciones finales (“colas”), cuando la temperatura es más alta y la concentración alcohólica es baja (aprox. 25–9° G.L.).

El metanol se distribuye de manera más uniforme, pero tiende a concentrarse en las fracciones intermedias (“corazón”), lo que dificulta su eliminación.

La densidad disminuye a medida que aumenta la concentración de alcohol y aumenta cuando predominan compuestos como agua y furfural en las fracciones finales. Las fracciones con mayor contenido de compuestos de alto peso molecular (mayor punto de ebullición) presentan densidades más altas.

Esta información muestra un orden de separación de compuestos en las distintas fracciones de la destilación del mezcal artesanal y refuerza la relevancia de emplear parámetros objetivos, como la concentración de etanol, para definir los cortes del destilado y asegurar tanto el cumplimiento normativo como la preservación de las propiedades sensoriales características del mezcal.

Además, diversos factores operativos y de materia prima influyen directamente en la cantidad y tipo de compuestos volátiles que terminan en cada fracción del mezcal. Ávila-Reyes et al. (2025) destacan que parámetros como la temperatura del proceso y la velocidad de destilación determinan la volatilización y arrastre de los compuestos; el tipo de alambique y su material (cobre, barro o acero) afectan la transferencia de calor y posibles reacciones secundarias; la madera utilizada como combustible modifica el perfil térmico y puede aportar compuestos aromáticos; y la especie de agave, su grado de madurez y la composición del mosto condicionan la formación de alcoholes superiores, ésteres y aldehídos durante la fermentación.

Optimización de la destilación de mezcal artesanal

La destilación artesanal del mezcal es un proceso sensible, en esta fase se definen la calidad del producto y su eficiencia. Por ello, en literaturas recientes coinciden en que introducir instrumentación básica y control reduce variaciones, mejora la repetibilidad de los cortes y disminuye el consumo de recursos, sin perder la esencia artesanal (Arellano-Plaza et al., 2022; Cancino et al., 2022; Sánchez et al., 2025).

Actualmente se ha buscado la alternativa de mejora como los destiladores solares con concentradores parabólicos compuestos (CPC), capaces de alcanzar 80–90 °C y reducir la dependencia de leña o gas (Ascencio-San Pedro et al., 2024). También se ha planteado la recirculación de agua en serpentín y montera (Caballero-Caballero et al., 2012), aunque con soluciones moderadas que dependen de la intervención del maestro mezcalero. Así como también, simulaciones de CFD (Computational Fluid Dynamics) y rediseños en acero inoxidable han reportado mejoras en estabilidad térmica y reducción de subproductos (Lorenzo-Santiago et al., 2023), aunque se alejan de la esencia artesanal del cobre.

Solís-Núñez y Trujillo-Valdivieso (2008), desarrollaron una propuesta de instrumentación y control para la etapa de destilación/rectificación (lazos de temperatura y flujo, esquemas en cascada) con el objetivo de hacer más homogéneo el proceso, aumentar la velocidad operativa y reducir la variabilidad de las variables controladas; el propósito explícito fue lograr mejor calidad del producto, ahorro de energía y menor contaminación en un contexto de producción artesanal. Aunque es una propuesta de ingeniería aplicada (no un ensayo industrial a gran escala), documenta la factibilidad de llevar control clásico a alambiques de mezcal.

En un estudio realizado por Caballero-Caballero et al. (2012), menciona que la ineficiencia térmica en la etapa de condensación del mezcal, provocada por el sobrecalentamiento del agua de enfriamiento, afecta la velocidad del proceso y la estabilidad química del destilado. Diagnosticaron esta ineficiencia y propusieron un sistema de recirculación de agua que estabiliza la temperatura del enfriamiento, reduce pérdidas y mejora la eficiencia de condensación.

La producción de mezcal está conformada por una gran cantidad de productores que elaboran mezcal en pequeñas fabricas artesanales denominadas palenques, empleando herramientas y equipo rudimentario. En estos lugares, el mezcal ha sido elaborado de manera tradicional por varias generaciones y aunque su producción es limitada, su importancia radica en la gran cantidad de palenques

existentes y que en muchas ocasiones esta actividad representa la principal fuente de ingresos de los productores (Bautista et al., 2017; Meza et al., 2017).

2.6 Sistema de control

El control automático de procesos surgió como respuesta a la creciente complejidad industrial y hoy es un tema central para mantener variables críticas dentro de rangos seguros y eficientes. En términos prácticos, su adopción permite reducir costos, mejorar la calidad, estabilizar la operación y aumentar productividad, al tiempo que disminuye la variabilidad y el consumo de energía. Estos beneficios se han documentado de manera amplia en las industrias de procesos (química, refinería, alimentos y bebidas), donde el control actúa como “capa” que sostiene la operación cerca de los puntos óptimos y dentro de restricciones de seguridad y calidad (Qin y Badgwell, 2003).

2.6.1 Lógica difusa

Es una herramienta matemática utilizada para tomar decisiones cuando la información no es completamente precisa o cierta. A diferencia de la lógica tradicional, que solo acepta valores verdaderos o falsos, la lógica difusa permite trabajar con grados intermedios, tal como ocurre en el razonamiento humano. Esto la hace especialmente útil en sistemas de control y automatización, donde las variables del proceso no siempre se comportan de forma exacta y es necesario interpretar condiciones como “temperatura alta”, “flujo medio” o “riesgo bajo” para actuar de manera flexible y eficiente. En los últimos años, su aplicación ha crecido en áreas como ingeniería, energía, agricultura inteligente y sistemas híbridos con inteligencia artificial (Saatchi, 2024).

Aunque el término ganó reconocimiento en 1965 gracias al trabajo del profesor Lofti Zadeh, quien publicó un artículo sobre conjuntos difusos, sus fundamentos se habían desarrollado mucho antes. En los años veinte, el matemático polaco Jan Łukasiewicz exploró el concepto de incertidumbre y propuso una lógica basada en valores imprecisos, sentando las bases para lo que después se convertiría en la lógica difusa (Zadeh, 1965).

Un sistema difuso emplea variables lingüísticas cuyos valores se expresan a través de conjuntos difusos. Por ejemplo, la temperatura en un determinado proceso puede representarse como una variable lingüística con categorías como baja, media o alta (Zadeh, 1965). Estos valores se definen mediante conjuntos difusos y se describen a través de funciones de membresía, como se ilustra en la Figura 7.

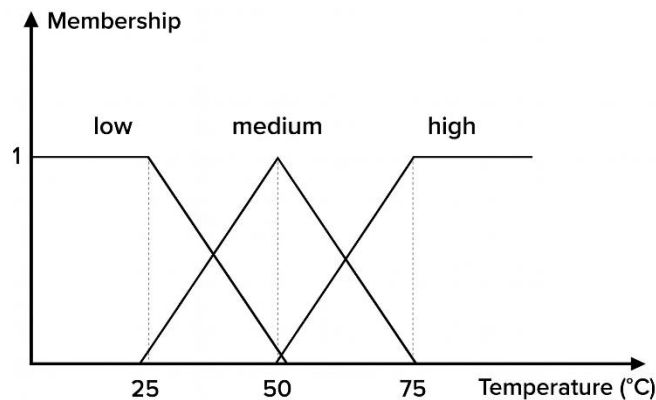


Figura 7. Funciones de pertenencia para la variable temperatura.

Fuente: (Ccalli-Pacco, 2024).

2.6.2 Control difuso

El control difuso ofrece un enfoque formal para representar, procesar y aplicar el conocimiento heurístico humano en la gestión de sistemas. Su origen se encuentra en los sistemas basados en reglas para la toma de decisiones, combinados con la lógica difusa para evaluar dichas reglas (Zadeh, 1965).

Al igual que otros tipos de controladores, los sistemas difusos reciben valores de las variables de entrada, los procesan mediante un conjunto de reglas, determinan cómo ajustar las variables de salida y ejecutan los cambios, influyendo en el comportamiento del sistema. Esta metodología es especialmente útil para el desarrollo de controladores no lineales, ya que permite integrar información heurística basada en el conocimiento de la dinámica del sistema (Saatchi, 2024).

Es un controlador basado en reglas que representa el conocimiento del operador con términos lingüísticos y lo ejecuta mediante tres operaciones clave: fuzzificación de las mediciones, inferencia con una base de reglas y defuzzificación para obtener la acción sobre el actuador (Nishanth et al., 2024).

Destaca en procesos con no linealidades e incertidumbre porque no exige un modelo exacto y conserva la interpretabilidad, y la variante Takagi-Sugeno permite tratar restricciones y desempeño con criterios actuales. La literatura reciente reporta su uso amplio en automatización de procesos y documenta beneficios en estabilidad, calidad y eficiencia energética frente a esquemas clásicos cuando las condiciones de operación cambian o las señales son ruidosas (Chang et al., 2025; Saatchi, 2024).

En procesos de la industria química y de destilación, el control difuso se ha aplicado para estabilizar variables acopladas y mejorar rendimiento y calidad (Mohindru, 2024). Ejemplos recientes incluyen una torre de destilación de metanol con un esquema híbrido (red neuronal difusa type-2) para regular temperatura y presión de tope, y revisiones de control en plantas químicas que comparan PID, FLC e híbridos bajo operación no lineal (Gong et al., 2025).

2.7 Literatura citada

- Arellano-Plaza, M., Páez L., J. B., Soto C., N. O., Kirchmayr, M. R., y Gschaedler M., A. (2022). Mezcal production in mexico: between tradition and commercial exploitation. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 6:832532. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.832532>
- Ávila-Reyes, S. V., Jiménez A., A. R., Melgar L., G., Fajardo E., F. S., y Hernández S., H. (2025). Mezcal: A Review of Chemistry, Processing, and Potential Health Benefits. *Foods*, 14(8), 1408. <https://doi.org/10.3390/foods14081408>
- Balcerek, M., Pielech P., K., Patelski, P., Dziekońska K., U., y Strąk, E. (2017). The effect of distillation conditions and alcohol content in 'heart' fractions on the concentration of aroma volatiles and undesirable compounds in plum brandies: Distillation conditions affect plum distillates quality. *Journal of the Institute of Brewing*, 123(3), 452-463. <https://doi.org/10.1002/jib.441>
- Bautista, J. A., Cirilo, S. O., y Melchor, E. T. (2017). La disminución de la producción artesanal de mezcal en la Región del mezcal de Oaxaca, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6(6), 1291-1305. <https://doi.org/10.29312/remexca.v6i6.577>

- Bautista González, M. A. (2011). Cruda realidad. Producción, consumo y fiscalidad de las bebidas en México y América Latina, siglos XVII-XX. *América Latina en la historia económica*, 35, 306-312. Recuperado en 03 de octubre de 2025, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-22532011000100013&lng=es&tlng=es.
- Becerra-Lucio, P. A., Diego G., E., Guillén N., K., y Peña R., Y. J. (2022). Unveiling the microbial ecology behind mezcal: a spirit drink with a growing global demand. *Fermentation*, 8(11), 662. <https://doi.org/10.3390/fermentation8110662>
- Caballero-Caballero, M., Silva S., L., y Montes B., J. L. (2012). Diseño de un sistema de recirculación y enfriamiento del agua para la destilación del mezcal. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 774-784. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342012000900021
- Cancino, H. N., Martínez, D. J., Terán, F. R., y Urbina, J. A. S. (2022). Behavior of the volatile compounds regulated by the Mexican Official Standard NOM-070-SCFI-2016 during the distillation of artisanal Mezcal. *Biotechnia*, 24(2), 20-27. <https://doi.org/10.18633/biotechnia.v24i2.1577>
- Ccalli-Pacco, H. C. (2024). Modeling and simulation in temperature control in milk coagulation for edam cheese production using fuzzy logic. En X.-S. Yang, S. Sherratt, N. Dey, & A. Joshi (Eds.), *Proceedings of Ninth International Congress on Information and Communication Technology* (pp. 443-453). Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-981-97-3289-0_36
- Chang, W. J., Lin, Y. H., y Ku, C. C. (2025). A Comprehensive Survey on Advanced Control Techniques for T-S Fuzzy Systems Subject to Control Input and System Output Requirements. *Processes*, 13(3), 792. <https://doi.org/10.3390/pr13030792>
- Chimal, A. (2023). La regulación de bebidas embriagantes en México/Nueva España. Un análisis de los esquemas de prohibición en la larga duración. *IBEROAMERICANA. América Latina - España - Portugal*, 83-106. <https://doi.org/10.18441/IBAM.23.2023.83.83-106>
- Colunga-GarcíaMarín, P., y Zizumbo V., D. (2007). Tequila and other Agave spirits from west-central Mexico: Current germplasm diversity, conservation and origin. *Biodiversity and Conservation*, 16(6), 1653-1667. <https://doi.org/10.1007/s10531-006-9031-z>
- Consejo Mexicano Regulador de la Calidad del Mezcal, A.C. (COMERCAM) (2025). *Informe estadístico 2025*. https://comercam-dom.org.mx/wp-content/uploads/2025/06/INFORME_PUBLICO2025.pdf
- Correa-Ascencio, M., Robertson, I. G., Cabrera-Cortés, O., Cabrera-Castro, R., y Evershed, R. P. (2014). Pulque production from fermented agave sap as a dietary supplement in Prehispanic Mesoamerica. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(39), 14223-14228. <https://doi.org/10.1073/pnas.1408339111>
- De León-Meza, R. (2015). Coconut wine and mezcal: A history of joint commerce during the colonial era. *Letras Históricas*, 12, 15-36. <https://doi.org/10.31836/lh.12.1746>
- Delgado-Lemus, A., Casas, A., y Téllez, O. (2014). Distribution, abundance and traditional management of Agave potatorumin the Tehuacán Valley, Mexico:

- Bases for sustainable use of non-timber forest products. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, 10(1), 63. <https://doi.org/10.1186/1746-4269-10-63>
- Díaz-Barajas, S., Institute of Engineering, Universidad Nacional Autónoma de México, Querétaro, México, Garzón-Zúñiga, M. A., & Instituto Politécnico Nacional, Durango, México. (2024). Mezcal vinasses treatment: A review of assessed processes. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 15(2), 164-206. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-15-02-04>
- Secretaría de Economía. (2017). *Norma Oficial Mexicana NOM-070-SCFI-2016, Bebidas alcohólicas-Mezcal-Especificaciones*.
- Espinoza-Martínez, V. A., Álvarez G., P. E., Palma C., F. de J., Enríquez V., R., Ramírez L, M. P., López S., C., y Vázquez L., H. G. (2023). Influence of the biotechnological process of mezcal fermentation on yeast diversity in four palenques of Oaxaca, Mexico. *Beverages*, 9(4), 99. <https://doi.org/10.3390/beverages9040099>
- FAOSTAT. (2023). *Cultivos y productos de ganadería*. <https://www.fao.org/faostat/es/#data/QCL>
- Food and Agriculture Organization (FAO). (2019). *El consumo de leña en la producción de mezcal: El caso de Santiago Matatlán, Oaxaca*. <https://www.fao.org/4/ad096s/ad096s03.htm>
- García-Garza, D. (2021). La modernización de la tradición. Algunos apuntes sobre la producción de mezcal. *Estudios Sociales. Revista de Alimentación Contemporánea y Desarrollo Regional*. <https://doi.org/10.24836/es.v31i57.1065>
- Gong, Y., Zhang, Q., Ren, Y., Liu, Z., y Abu Seman, M. T. (2025). Research on fuzzy control of methanol distillation based on SHAP (SHapley Additive exPlanations) Interpretability and generative artificial intelligence. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 25(5), 1308. <https://doi.org/10.3390/s25051308>
- González-Mireles, G. S. (2022). La confrontación por la abolición del estanco de aguardiente en Yucatán, 1781. *Secuencia*. <https://doi.org/10.18234/secuencia.v0i114.1954>
- Hatta-Sakoda, B., Guevara P., A., y Morales S., E. (2024). Evolution of acetaldehyde, methanol, and furfural in pisco distillation. *ACS Food Science & Technology*, 4(4), 889-894. <https://doi.org/10.1021/acsfoodscitech.3c00627>
- Heller, D., Roj, S., Switulla, J., Kölling, R., y Einfalt, D. (2022). Tackling Foam-Based Process Disruptions in Spirit Distillation by Thermal Energy Input Adaptations. *Food and Bioprocess Technology*, 15(4), 821-832. <https://doi.org/10.1007/s11947-022-02785-5>
- Hernández-Fabián, A. J. (2022). El cultivo de maguey en una hacienda pulquera a inicios del siglo XX: El caso de San Bartolomé del Monte, Tlaxcala. *Bloch. Revista Estudiantil de Historia*, 1(3), 10-27. <https://revistabloch.uanl.mx/index.php/b/article/view/40>
- Holguín-Loya, A. H., Salazar-Herrera, A. E., Soto-Cruz, N. O., Kirchmayr, M. R., Lopes, C. A., Rojas-Contreras, J. A., y Páez-Lerma, J. B. (2025). Enhancing mezcal production efficiency by adding an inoculant of native *Saccharomyces cerevisiae* to a Standardized Fermentation Must. *Foods*, 14(3), 341. <https://doi.org/10.3390/foods14030341>

- Lazo, O., García-Ortíz, A. L., Pardo, J., y Guerrero, L. (2025). Mezcal Characterization Through Sensory and Volatile Analyses. *Foods*, 14(3), 402. <https://doi.org/10.3390/foods14030402>
- Maciel-Martínez, J., Baltierra T., E., Taboada G., P., Aguilar V., Q., y Márquez B., L. (2020). Life Cycle Environmental Impacts and Energy Demand of Craft Mezcal in Mexico. *Sustainability*, 12(19), 8242. <https://doi.org/10.3390/su12198242>
- Manilla T., Y. (2023). *Análisis del impacto ambiental del proceso artesanal de producción de mezcal* (Tesis de maestría, Universidad Autónoma Chapingo, México). Consultada en: <https://repositorio.chapingo.edu.mx/items/65eb7328-369c-4cbb-8ce7-a285c2f90875>
- Marín C., R. (2022). *Análisis térmico de un destilador simple en el proceso de producción de mezcal tipo artesanal* (Tesis de maestría, Universidad Autónoma Chapingo, México). Consultada en: <https://repositorio.chapingo.edu.mx/handle/20.500.12098/942>
- Martínez-Estrada, S. C., Narváez Z., J. A., Rodríguez H., R., Grijalva Á., J., Gurrola R., J. N., Larralde C., C. P., y Chairez H., I. (2024). Diversity of culturable yeasts associated with the technification level in the process of mezcal production in the state of Durango. *Fermentation*, 10(3), 147. <https://doi.org/10.3390/fermentation10030147>
- Melchor-Quintas, B., Carvajal M., I., y Decimoquinto, P. (2024). Metodología de cálculo y modelado de las necesidades térmicas en el proceso de producción de una destiladora de mezcal tradicional. *Acta universitaria*. <https://doi.org/10.15174/au.2024.3880>
- Mezcal mal bien. (2025). *Mezcal production by region*. Consultada en: <https://www.mezcalmalbien.com/by-region>
- Mohindru, P. (2024). Review on PID, fuzzy and hybrid fuzzy PID controllers for controlling non-linear dynamic behaviour of chemical plants. *Artificial Intelligence Review*, 57(4), 97. <https://doi.org/10.1007/s10462-024-10743-0>
- Morales-Rodríguez, R. (2008). *Ingeniería básica de una planta para la industria del mezcal en Mitla, Tlaxolula, Oaxaca* [Tesis de maestría, Instituto Politécnico Nacional]. http://literatura.ciidiroaxaca.ipn.mx:8080/xmlui/handle/LITER_CIIDIRO_AX/71
- Meza, D. E. E., González, G. R., y Ángeles, B. E. M. (2017). Characterizing the production and organization of the mezcaleros in Matatln, Mexico “World capital of mezcal”. *Estudios Sociales Revista de Alimentación Contemporánea y Desarrollo Regional*, 27(50). <https://doi.org/10.24836/es.v27i50.465>
- Nishanth, F. P., Dash, S. K., y Mahapatro, S. R. (2024). Critical study of type-2 fuzzy logic control from theory to applications: A state-of-the-art comprehensive survey. *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, 10, 100771. <https://doi.org/10.1016/j.prime.2024.100771>
- Pérez-Akaki, P., Vega V., N. V., Enríquez C., Y. P., y Velázquez S., M. (2021). Designation of origin distillates in mexico: value chains and territorial development. *Sustainability*, 13(10), 5496. <https://doi.org/10.3390/su13105496>
- Qin, S. J., y Badgwell, T. A. (2003). A survey of industrial model predictive control technology. *Control Engineering Practice*, 11(7), 733-764. [https://doi.org/10.1016/S0967-0661\(02\)00186-7](https://doi.org/10.1016/S0967-0661(02)00186-7)

- Rawat, M., Varshney, A., Kandpal, R., Choudhary, A., Gupta, A. K., Pratiksha, Naik, B., Kumar, V., Kumar, A., Kheto, A., Bhatt, S., Makroo, H. A., Jha, A. K., y Rustagi, S. (2025). Exploration of compositional, functional, nutraceutical, and metabolites of Ram kandmool (*Agave sisalana* Perrine) for potential application in food systems. *International Journal of Biological Macromolecules*, 307, 142095. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.142095>
- Reyna, R. Z. (2021). *El mezcal de Villa Sola de Vega, Oaxaca: Proceso de producción, comercialización y economía moral Oaxaca* (Tesis de maestría, El Colegio de San Luis, México). Consultada en: <https://colsan.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1013/958/1/El%20mezcal%20de%20Villa%20Sola%20de%20Vega.pdf>
- Rieger, I. A. (2025). "Rewilding" the Mezcal Market: Cultural Practices and the Conservation of Agaves in Oaxaca, Mexico. *Wild*, 2(2), 20. <https://doi.org/10.3390/wild2020020>
- Ruiz-Camou, C., Núñez, J., y Musule, R. (2023). Evaluating the environmental performance of mezcal production in Michoacán, México: A life cycle assessment approach. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 28(12), 1658-1671. <https://doi.org/10.1007/s11367-023-02237-y>
- Saatchi, R. (2024). Fuzzy logic concepts, developments and implementation. *Information*, 15(10), 656. <https://doi.org/10.3390/info15100656>
- Sánchez F., R. E., Pérez L., A., Morales S., A., Manilla T., Y., Reyes C., E. D., y Avila U., G. (2025). Chemistry of Mezcal: Volatile Profile of Artisanal Mezcal Made from Wild Agaves of Oaxaca. *Foods*, 14(7), 1222. <https://doi.org/10.3390/foods14071222>
- Secretaría de Economía. (2017). NOM-070-SCFI-2016, Bebidas alcohólicas-Denominación, especificaciones fisicoquímicas, información comercial y métodos de prueba. Diario Oficial de la Federación, 30 de octubre de 2017. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php%3Fcodigo%3D5502882%26fecha%3D30/10/2017#gsc.tab=0
- SEMARNAT, S. de M. A. y R. (2019). *Agaves, maravillosas y magnánimas plantas*. gob.mx. <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/agaves-maravillosas-y-magnanimas-plantas>
- Servicio de Información Agroalimentaria y de Consulta (SIAP). (2024). Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. Consultada en: https://nube.agricultura.gob.mx/cierre_agricola/
- Solís-Núñez, J. F., y Trujillo-Valdivieso, S. (2008). *Propuesta de instrumentación de un sistema de control para una torre de destilación en la producción del mezcal*. (Tesis de maestría, Instituto Politécnico Nacional, México) Consultada en: <https://tesis.ipn.mx/jspui/bitstream/123456789/5000/1/PROPUESTAINSTRUMENT.pdf>
- Valadez-Montes, M. J. (2014). "Pulque limpio" / " Pulque sucio": Disputas en torno a la legitimidad y la producción social del valor". *Revista Colombiana de Antropología*, 50(2), 14-18. Recuperado el 01 de septiembre de 2025, de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0486-65252014000200003&lng=en&nrm=iso&tlng=es

- Vera-Guzmán, A. M., Guzmán-Gerónimo, R. I., López, M. G., y Chávez-Servia, J. L. (2018). Volatile Compound Profiles in Mezcal Spirits as Influenced by Agave Species and Production Processes. *Beverages*, 4(1), 9. <https://doi.org/10.3390/beverages4010009>
- Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8(3), 338-353. [https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X)
- Zizumbo-Villarreal, D., y Colunga-GarcíaMarín, P. (2008). Early coconut distillation and the origins of mezcal and tequila spirits in west-central Mexico. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 55(4), 493-510. <https://doi.org/10.1007/s10722-007-9255-0>

3. IMPLEMENTACIÓN DE CONTROL TÉRMICO CON LÓGICA DIFUSA PARA LA RECIRCULACIÓN DE AGUA EN LA DESTILACIÓN DE MEZCAL

3.1 Introducción

El mezcal es una bebida espirituosa originaria de México con reconocimiento internacional por su valor cultural, histórico y económico, especialmente en regiones como Oaxaca, donde su producción es una fuente importante de empleo para comunidades rurales (COMERCAM, 2025). Su elaboración tradicional comprende etapas características como la cocción en horno de tierra, molienda, fermentación y destilación, proceso en el cual se define en gran medida la calidad sensorial y la seguridad del producto final (Cancino et al., 2022). En la destilación artesanal, los alambiques de cobre operan sin control térmico, lo que ocasiona fluctuaciones de temperatura, un alto consumo de recursos y la formación de compuestos volátiles como metanol y furfural (Cancino et al., 2022; Sánchez et al., 2025). Se utilizan alrededor de 50 kg de leña por carga y hasta 360 kg por ciclo (Díaz-Barajas et al., 2024), siendo la destilación la etapa más intensiva en energía, con eficiencias ≤ 10 % y responsable del 87 % del consumo energético (Ruiz-Camou et al., 2023). A esto se suma un uso intensivo de agua: entre 30 y 50 L por cada litro de mezcal producido, gran parte sin recirculación, lo que reduce la eficiencia de condensación y aumenta las pérdidas térmicas (Caballero-Caballero et al., 2012).

Actualmente se ha buscado la alternativa de mejora como los destiladores solares con concentradores parabólicos compuestos (CPC), capaces de alcanzar 80–90 °C y reducir la dependencia de leña o gas (Ascencio-San Pedro et al., 2024).

Así como también, simulaciones CFD y rediseños en acero inoxidable han reportado mejoras en estabilidad térmica y reducción de subproductos (López-García et al., 2024), aunque se alejan de la esencia artesanal del cobre.

La instrumentación de procesos tradicionales mediante lógica difusa ha demostrado ser una alternativa eficaz en escenarios donde no es posible modelar con precisión las dinámicas del sistema, al ofrecer control flexible, adaptable y de bajo costo (Moo-Medina y Romero-Romero, 2018). Esta tecnología permite regular de forma automática la respuesta de un sistema complejo como la destilación artesanal, respetando su naturaleza empírica y evitando la mecanización completa que pueda poner en riesgo su carácter artesanal.

Este trabajo evalúa la implementación de un control térmico por lógica difusa en un alambique artesanal de cobre para regular la temperatura de la montera mediante recirculación automatizada de agua. Se compara la destilación tradicional (DT) con una destilación modificada (DM) y se analiza el efecto en la eficiencia térmica, el consumo de agua y leña, y la calidad fisicoquímica del mezcal. El objetivo es reducir el uso de agua y leña, estabilizar la temperatura y preservar la calidad conforme a la NOM-070-SCFI-2016.

3.2 Materiales y métodos

3.2.1 Lugar de experimentación

El estudio se realizó en un palenque ubicado en la comunidad de Sitio de Xitlapehua, Miahuatlán, Oaxaca. El territorio del municipio mide 18.281 km² que representan el 0.02% del total del territorio estatal. Así como se observa en la figura 8, se localiza en la parte sur del Estado, específicamente pertenece al territorio del Distrito de Miahuatlán en coordenadas 16°21' latitud norte y 96°32' longitud oeste, a una altura de 1,570 metros sobre el nivel del mar.

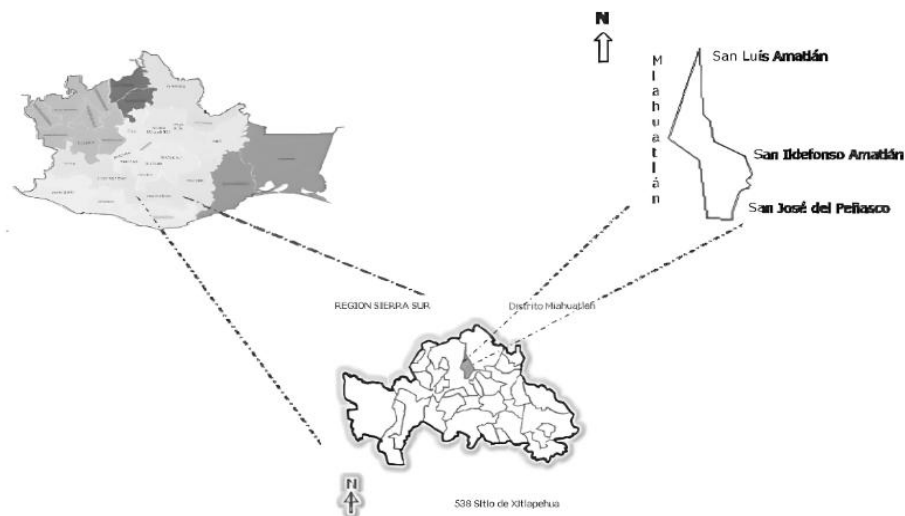


Figura 8. Mapa del Estado de Oaxaca, ubicación del municipio donde se realizó la investigación.

Fuente: Elaboración propia.

Descripción del equipo de experimentación

En la figura 9 se observa cómo está constituido el equipo de destilación en el palenque, así como los elementos principales que lo conforman:



Figura 9. Esquema de los elementos que conforman el sistema de destilación artesanal de mezcal.

Olla de evaporación: Recipiente cilíndrico de cobre con una capacidad de 150 litros, 0.65 m de diámetro y 0.66 m de altura. Esta olla se encuentra suspendida dentro de una estructura de ladrillo conocida como horno, cuya función es concentrar el calor generado por la combustión de leña. El horno presenta dimensiones de 1.33 m de largo, 1.31 m de ancho, 1.18 m de altura y posee en su base una cavidad donde se introduce la leña para generar calor.

Montera interna: Campana de cobre que sirve como tapa de la olla y dirige el vapor hacia la siguiente etapa del proceso. Tiene 0.32 m de diámetro y 0.33 m de altura.

Montera externa: Recubre la montera interna y actúa como intercambiador de calor, ya que se llena con agua fría para facilitar la condensación del vapor alcohólico. Sus dimensiones son de 0.44 m de diámetro y 0.47 m de altura. Esta doble cámara es esencial para regular la temperatura del vapor antes de su paso al tubo de conducción.

Turbante: Tubo conductor del vapor, también de cobre, con 0.045 m de diámetro y 2.40 m de longitud, que conecta la parte superior de la montera externa con el serpentín. Durante este trayecto, parte del calor se disipa al ambiente, iniciando un proceso de pre-condensación.

Serpentín: Conducto de cobre en forma helicoidal, donde ocurre la condensación final del vapor en forma líquida. Tiene un diámetro de 0.33 m, una altura de 0.80 m y un total de 4.5 vueltas (cuatro completas y dos medias). Este serpentín se encuentra completamente sumergido en una pileta de concreto llena de agua.

Pileta o cisterna de enfriamiento: Depósito de forma cúbica con dimensiones de 1.31 m de ancho, 1.33 m de largo y 1.18 m de altura, que contiene aproximadamente 4100 L de agua. Su función es mantener la temperatura adecuada para la condensación del vapor que atraviesa el serpentín.

El diseño de este sistema de destilación responde a prácticas tradicionales que han sido heredadas por generaciones, y cuya operación se basa en la experiencia empírica del maestro mezcalero para ajustar el fuego, regular el flujo

de agua y cortar las fracciones del destilado (punta, corazón y shishe) según su sabor, aroma y fuerza alcohólica.

El diagrama de flujo correspondiente al proceso de destilación tradicional se presenta en el Apéndice 1.

Estudio de diagnóstico inicial del proceso tradicional

Con el propósito de evaluar el impacto de la implementación de un sistema de control térmico en la destilación artesanal de mezcal, se llevó a cabo un análisis comparativo entre dos condiciones de operación: el proceso tradicional (DT), sin regulación automatizada de temperatura, y el proceso modificado (DM), que incorpora un sistema de recirculación de agua controlado por lógica difusa.

La evaluación se centró en tres aspectos fundamentales:

1. El consumo de recursos (agua, energía y leña).
2. La eficiencia térmica del sistema Tradicional.
3. Las propiedades fisicoquímicas del mezcal obtenido en ambas condiciones de destilación.

3.2.2 Ecuaciones de transferencia de calor y pérdidas energéticas

Se aplicaron balances de materia y energía en cada uno de los procesos, lo que permitió cuantificar los flujos térmicos, las pérdidas energéticas y el rendimiento del sistema.

Para el cálculo del balance de materia se empleó el principio de conservación de la masa (Çengel y Boles, 2015), sobre un volumen de control, se usó la forma integral:

$$E + G - S - C = A \quad \text{Ecuación 1}$$

donde E es la entrada total, S la salida total, G la generación interna de masa, C el consumo interno y A la acumulación en el intervalo analizado. En este estudio se utilizó:

$$m_{bag} + m_{gua} = m_{vap} + m_{res_bag} + m_{vin} \quad \text{Ecuación 2}$$

siendo m_{bag} la masa del bagazo, m_{gua} la masa del guarape, m_{vap} el vapor generado, m_{res_bag} es residuo de bagazo y m_{vinaza} es la masa de vinazas.

Para estimar los requerimientos energéticos y las pérdidas de calor en el sistema se aplicaron ecuaciones de transferencia de calor y balance de energía basado en la Primera Ley de la Termodinámica (Cengel y Boles, 2015).

$$H_{entrada} = H_{salida} \quad \text{Ecuación 3}$$

Con:

$$H_{salida} = \Delta H_{mezcla} + \Delta H_{olla} + \Delta H_{pérdidas} \quad \text{Ecuación 4}$$

Energía requerida por la mezcla.

$$Q_{req_mezcla} = m_{bag}Cp_{bag}(T_f - T_i) + m_{gua}Cp_{gua}(T_f - T_i) + m_{mezcal}(h_v - h_l) \quad \text{Ecuación 5}$$

donde C_p es el calor específico de cada fase, T_i y T_f son temperaturas inicial y final, y $(h_v - h_l)$ representa el cambio de entalpía específico por cambio de fase del mezcal.

Pérdida energética

Cuando se conoce la masa y el valor del C_p se puede estimar mediante ecuaciones empíricas.

$$Q_{pérdida} = m \cdot C_p \cdot (T_{sal} - T_{int}) \quad \text{Ecuación 6}$$

Para superficies, se obtiene con la ecuación del coeficiente global de transferencia de calor U (Woods, 2007).

$$Q_{pérdida} = U \cdot A_s \cdot (T_s - T_{\infty}) \quad \text{Ecuación 7}$$

donde A_s es el área expuesta, T_s la temperatura de superficie y T_∞ la temperatura del entorno.

Consumo energético y eficiencia térmica

$$Q_{\text{útil}} = Q_{\text{req_mezcla}} + Q_{\text{olla}}, \quad \text{Ecuación 8}$$

$$Q_{\text{suministrada}} = \dot{m}_{\text{leña}} \cdot PCI \quad \text{Ecuación 9}$$

$$n (\%) = \frac{Q_{\text{útil}}}{Q_{\text{suministrada}}} \times 10 \quad \text{Ecuación 10}$$

donde $n (\%)$ es la eficiencia térmica.

3.2.3 Instrumentación

El sistema instrumentado mantuvo los principales equipos de destilación; un alambique de cobre tradicional montado sobre una base de mampostería (horno y pileta), cabe mencionar que no se alteró su configuración artesanal. La modificación principal consistió en la instalación de un circuito de recirculación de agua, destinado a estabilizar la temperatura en la montera durante la destilación.

El sistema está compuesto por:

- Una bomba centrífuga autocebante de corriente directa, marca Lampo, con potencia nominal de 180 W (1/4 HP) y alimentación de 12 V CC.
- Tubería de cobre de 1/3 de pulgada de diámetro.
- Una doble pared en la montera, conectada hidráulicamente a la pileta de agua para permitir la circulación de agua fría.

La recirculación de agua se realiza de la siguiente manera: el agua fría de la pileta es impulsada hacia la montera por la bomba, donde absorbe calor del sistema; luego, el agua caliente retorna nuevamente a la pileta, completando así el ciclo de recirculación.

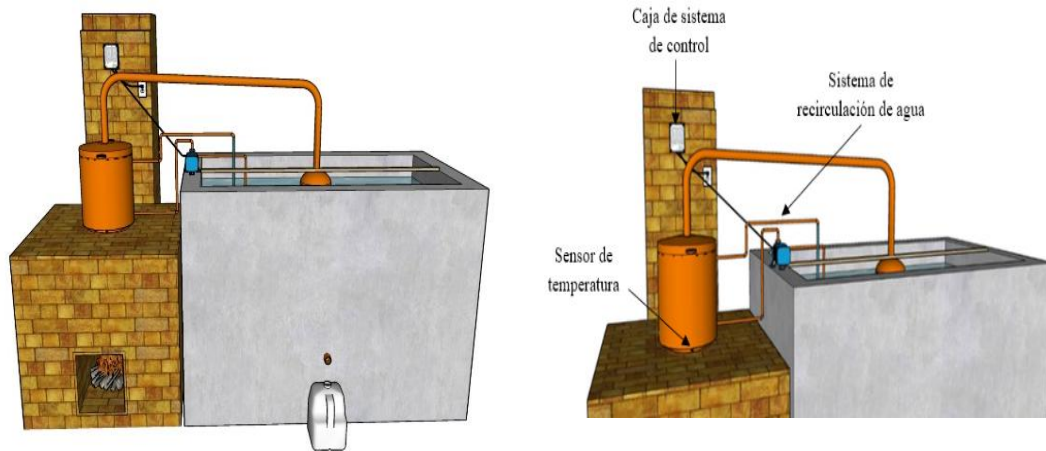


Figura 10. Modelo del destilador instrumentado.

La figura 10 presenta el modelo de instrumentación del alambique de cobre, que consistió en la instalación de un tubo de cobre de 1/3 de pulgada, que conecta la pileta de agua con la bomba utilizada en el sistema (descrita anteriormente), a su vez, conecta con la montera, ésta cuenta con doble pared, para contener el agua de intercambio de calor, y finalmente, la salida de agua caliente de la montera está conectada con la pileta de agua para facilitar la recirculación del agua de enfriamiento.

Se fabricó un nuevo cabezal o montera con la instalación de un sensor de temperatura RTD PT100 (Ver cuadro 1) por la parte interior del cuello de la campana (montera interna) que conecta con la olla, reemplazando la montera actual (Figura 11).



Figura 11. Montera adaptada para recirculación de agua y colocación de sensor.

Diseño del sistema de control

Para el monitoreo de temperatura en el destilador, se seleccionó un sensor RTD PT100 (Resistance Temperature Detector) debido a sus características adecuadas para operar en las condiciones del proceso de destilación.

Un Pt100 es un sensor de temperatura. Consiste en un alambre de Platino (PT) que a 0 °C tiene 100 Ω y que al aumentar la temperatura aumenta su resistencia eléctrica. En la figura 12 se presenta el incremento de la resistencia, no es lineal, pero sí creciente y característico del platino de tal forma que mediante tablas es posible encontrar la temperatura exacta a la que corresponde.

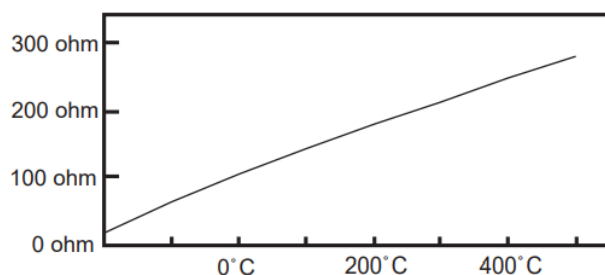


Figura 12. Curva característica R-T de sensor RTD.

Normalmente las Pt100 industriales se consiguen encapsuladas en la misma forma que las termocuplas, es decir, dentro de un tubo de acero inoxidable u otro material (vaina), en un extremo está el elemento sensible (alambre de platino) y en el otro está el terminal eléctrico de los cables protegido dentro de una caja

redonda de aluminio (cabezal), las especificaciones del termopar usado vienen en el siguiente cuadro 1.

Cuadro 1. Características del sensor de temperatura RTD PT100.

Especificaciones	
Tipo de sensor	PT100
Material de la sonda	Teflón
Numero de cables	3 hilos
Exactitud	Clase A
Tolerancia	$\pm 0.15 + 0.002$ (°C)
Rango de funcionamiento de la temperatura	0 °C a 200 °C
Longitud de la sonda	100 mm
Diámetro de la sonda	6mmØ
Tipo de terminación	Cable
Longitud del cable	2.5 m
Conexión de proceso	Conector a proceso sencillo de ½ NPT
Cubierta	Acero inoxidable

Conexión eléctrica del sistema de control

El sistema de control se diseñó para controlar la temperatura de la destilación artesanal de mezcal. La figura 13 muestra la arquitectura implementada, basada en dos placas Arduino Mega 2560 que se comunican entre sí, mediante una comunicación serial.

La primera placa, denominada emisor, adquiere la señal de temperatura proveniente de un sensor PT100 conectado a un módulo MAX31865 (conversor RTD–SPI), el cual permite obtener mediciones térmicas de forma sencilla y confiable a partir de sensores RTD. Este módulo convierte la variación de resistencia del PT100 en una señal digital mediante un convertidor analógico digital (ADC) delta-sigma de 15 bits (resolución de 0.03125 °C), lo que mejora la precisión en la adquisición de datos. La comunicación con el microcontrolador se realiza mediante el protocolo SPI (Serial Peripheral Interface), lo que facilita su integración con plataformas como Arduino. Posteriormente, los datos se envían a una segunda placa, que funciona como unidad maestra o receptora. Esta placa

procesa la información obtenida, ejecuta el algoritmo de control difuso y genera una señal de salida en forma de modulación por ancho de pulso (PWM).

La señal PWM se aplica a un driver IBT-2 (BTS7960), encargado de accionar una bomba de recirculación de agua. Dado que la bomba opera con una potencia nominal de 15 A, se seleccionó el IBT-2 debido a su capacidad para soportar una corriente máxima de operación de hasta 43 A. Este módulo permite controlar las revoluciones de la bomba mediante PWM y, en consecuencia, regular el flujo de agua. De esta manera, el sistema ajusta de manera automática la velocidad de la bomba y, con ello, el caudal de agua destinado al enfriamiento de la montera. La alimentación eléctrica se realizó con una fuente conmutada de 12 V CC y 15 A (180 W), con entrada universal de 110–245 V AC, la cual suministró energía al driver y a la bomba.

Se utilizó una pantalla LCD de 20 columnas por 4 filas con interfaz I2C para mostrar en tiempo real la fecha y hora, temperatura del sistema, el valor de referencia (Setpoint) y la señal de control aplicada a la bomba (PWM). Este dispositivo permite que el operador supervise el comportamiento térmico del proceso de manera directa en campo. Asimismo, se integró un módulo de reloj de tiempo real DS1302, responsable de mantener y registrar la fecha y la hora; este cuenta con una batería de litio (3 V) que asegura la continuidad del conteo aun ante cortes de energía. Finalmente, para la recopilación y almacenamiento de los datos experimentales se incorporó un módulo lector de tarjetas microSD, el cual permite generar un archivo que almacena la temperatura, fecha, hora y el valor de la señal de control aplicada.

Los códigos utilizados para la programación del sistema se presentan en los Apéndices 5 y 6.

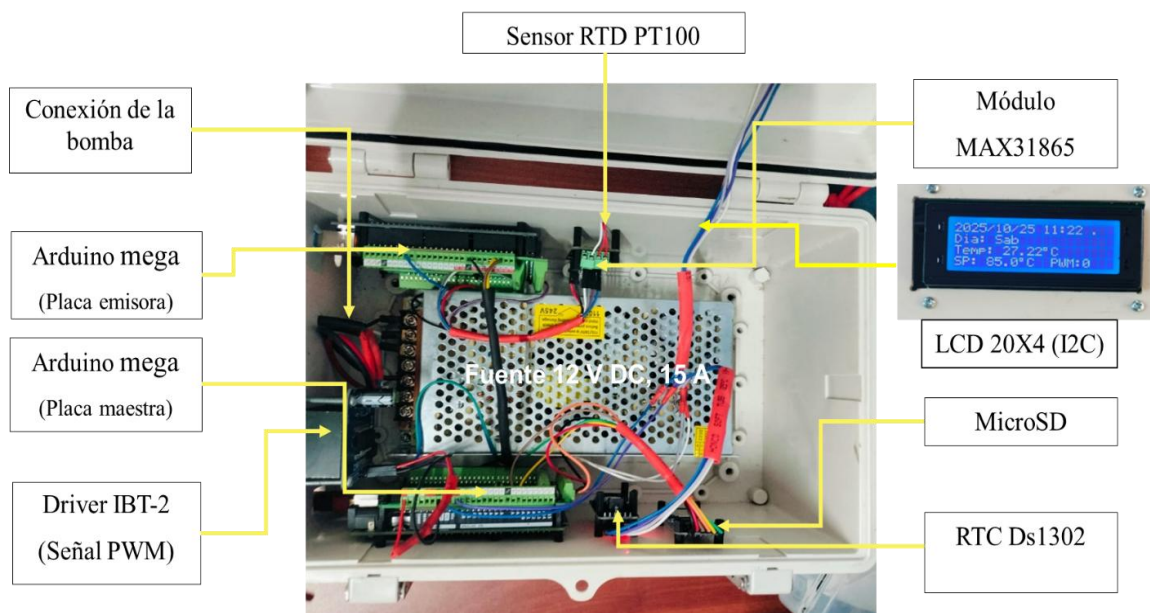


Figura 13. Gabinete de conexiones eléctricas del sistema de control.

Desarrollo del algoritmo del control difuso

Para el control de flujo de agua en la montera del destilador, se implementó una estrategia basada en lógica difusa (FLC) programado en una tarjeta Arduino Mega dentro del entorno de Arduino IDE. El objetivo del sistema fue mantener la temperatura de operación dentro de un intervalo estable (80-89 °C) mediante la regulación automática de la velocidad de una bomba de recirculación de agua, controlada a través de un driver IBT-2.

Variables de proceso y setpoint

La variable controlada corresponde a la temperatura del vapor en la parte superior de la olla de destilación, $T(k)$, medida en °C. La variable manipulada es la señal PWM (0–255) aplicada al IBT-2, que regula la velocidad de la bomba. El setpoint se fijó en 85 °C, valor asociado a la estabilidad del proceso de destilación.

Definición del error de control

La variable de entrada al controlador difuso se definió como el error:

$$e(k) = T(k) - T_{sp} \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde $T(k)$ es la temperatura medida y T_{sp} el setpoint de 85 °C. Cuando $e < 0$, el proceso se considera frío; si $e = 0$, estable; y si $e > 0$, caliente. En el código esta operación se implementa mediante: *float error Value = temperature – setpoint.*

Se empleó un controlador difuso tipo Mamdani, utilizando la librería Fuzzy.h en Arduino IDE. El sistema es de una entrada (error de temperatura) y una salida (PWM de la bomba). Para la construcción del controlador se utilizaron funciones de membresía trapezoidales para los conjuntos “Frío” y “Caliente”, y una función triangular para el conjunto “Estable”.

En el cuadro 2 y 3 muestran las funciones de pertenencia de la variable de entrada (error) y la variable de salida (PWM de la bomba).

Cuadro 2. Entrada (error, °C).

Conjunto	Puntos característicos (°C)
Frío	(-10, -5, -5, 0)
Estable	(-2, 0, 0, +2)
Caliente	(0, +5, +10, +15)

Cuadro 3. Salida (PWM).

Conjunto	Puntos característicos (PWM)
Bajo	(0, 50, 50, 100)
Medio	(80, 150, 150, 200)
Alto	(180, 255, 255, 255)

Reglas difusas utilizadas (IF-THEN)

- IF error es Frío THEN PWM Bajo.
- IF error es Estable THEN PWM Medio.
- IF error es Caliente THEN PWM Alto.

Inferencia y defuzzificación

Inferencia Mamdani con operadores min–max y defuzzificación por centroide, obteniendo un PWM único que se satura a (0,255). En la figura 14 se presenta el diagrama de flujo de los algoritmos de control.

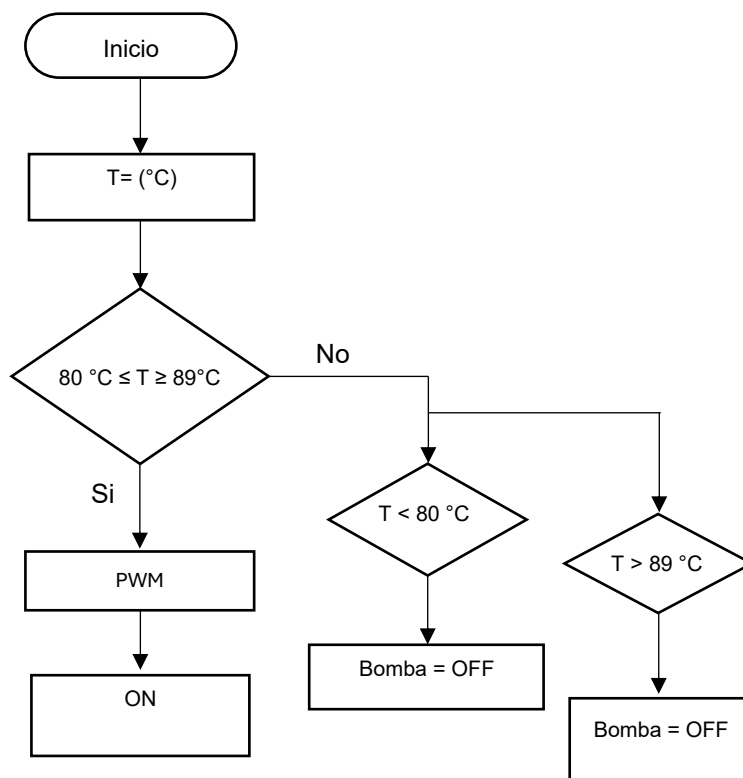


Figura 14. Diagrama de flujo de los algoritmos de control.

3.2.4 Instalación del sistema de control

El sistema de control se integró al destilador artesanal sin modificar su forma tradicional. Como se muestra en la Figura 15, se instaló la bomba de recirculación en la línea de enfriamiento de la montera y se colocó el sensor de temperatura en la parte superior e interna de la olla de evaporación. La Figura 16 presenta el gabinete de control, ubicado en un punto lateral de la pileta y elevado para proteger la electrónica y desde el cual se emite la señal PWM que acciona la bomba. Esta instalación permite regular el flujo de agua y controlar la temperatura, manteniendo la esencia del proceso tradicional.



Figura 15. Instalación del sistema de control.



Figura 16. Gabinete de control.

3.2.5 Propiedades fisicoquímicas

Se destiló una postura por día, con una duración promedio de 3 h por proceso. En cada proceso de destilación (tradicional y modificado) se recolectaron 10 muestras de 150 mL de mezcal a intervalos de 15 min. Las muestras se conservaron a temperatura ambiente en frascos de vidrio herméticos y se protegieron de la luz con papel aluminio hasta su análisis.

Los análisis fisicoquímicos de las muestras de mezcal se realizaron por triplicado, empleando métodos estandarizados e instrumentación especializada, según se describe a continuación:

Porcentaje de Sólidos solubles totales

Los sólidos solubles totales de las muestras se determinaron utilizando un refractómetro digital portátil (HANNA, HI96801, 0-85 % Brix).

Densidad

La densidad de las muestras se determinó utilizando un densímetro portátil SNAP 51 (Anton Paar, GmbH, Graz, Austria). Se inyectó un volumen aproximado de 2 mL de la muestra directamente en el equipo, y se registraron los valores obtenidos.

Contenido de alcohol

El contenido de etanol se midió conforme a lo establecido en la NMX-V-013-NORMEX-2013, a una temperatura de 20 °C. Se determinó utilizando un densímetro portátil SNAP 51 (Anton Paar, GmbH, Graz, Austria). Se inyectó un volumen aproximado de 2 mL de la muestra directamente en el equipo, y se registraron los valores obtenidos.

Metanol y Furfural

La identificación y cuantificación se llevaron a cabo mediante Microextracción en fase sólida (SPME) en la fase de vapor (HS), acoplada a cromatografía de gases con detector selectivo de masas (GC-MSD). Se colocaron 5 mL de mezcal en viales para SPME con una capacidad de 22 mL; cada vial se agitó a 800 rpm y se expuso una fibra DVB/CWR/PDMS (Divinylbenzene/Carbon wide range/Polydimethylsiloxane; 10 mm, 50/30 µm; Agilent Technologies) al espacio de cabeza durante 60 min. Finalizada la extracción, la fibra se insertó en el puerto de inyección del cromatógrafo a 180 °C durante 15 min en modo splitless. Previo a cada inyección, la fibra se acondicionó a 220 °C por 15 min. Se incluyó un blanco (vial sin muestra) bajo las mismas condiciones para controlar posibles arrastres y el fondo instrumental.

La separación cromatográfica se realizó en una columna capilar DB-WAX Ultra Inert (60 m × 250 µm × 0.25 µm) con el siguiente programa de horno: 40 °C por 4 min, rampa de 5 °C/min hasta 100 °C y de 10 °C/min hasta 200 °C, con 10 min de mantenimiento final. Se empleó helio como gas acarreador a 1 mL/min; el inyector se mantuvo a 180 °C. El MSD operó en ionización electrónica (70 eV), barrido 30–550 m/z, 13.8 espectros/s, con fuente a 200 °C y línea de

transferencia a 250 °C. La adquisición y el procesamiento de datos se realizaron utilizando el software MassHunter Workstation (Agilent Technologies, 2012). Cada muestra se analizó por triplicado y se utilizaron blancos con viales sin muestra y viales que contenían una mezcla de etanol y agua.

3.2.6 Análisis estadístico de resultados

Se elaboraron gráficas en SigmaPlot v14.0 (2018) para visualizar el comportamiento de las variables fisicoquímicas (alcohol, densidad, sólidos solubles totales, metanol y furfural) y la temperatura durante ambos procesos de destilación tradicional (DT) y destilación modificada (DM), además de señalar los cortes de las fracciones y las “refrescadas” realizadas.

Se utilizó la prueba t de Student para comparar las medias de las variables entre los procesos de destilación tradicional (DT) y destilación modificada (DM). Previamente, se evaluaron los supuestos de normalidad mediante la prueba de Shapiro-Wilk y la homogeneidad de varianzas con la prueba de Levene.

Posteriormente, se realizó una correlación de Pearson para identificar la fuerza y dirección de las relaciones lineales entre las variables fisicoquímicas evaluadas en ambos procesos. Con el fin de comprobar la idoneidad de los datos para un análisis factorial, se aplicó la prueba de esfericidad de Bartlett, la cual permite verificar si la matriz de correlaciones es significativamente diferente de la matriz identidad y finalmente, se efectuó un Análisis de Componentes Principales (ACP) para visualizar las tendencias y agrupamientos de las muestras en función de las variables. Los análisis se realizaron en el lenguaje de programación R versión 4.5.1 (R Core Team, 2024) dentro del entorno integrado de desarrollo RStudio versión 2023.09.1.

3.3 Resultados y discusión

3.3.1 Resultado de diagnóstico inicial del proceso tradicional y modificado

Diagrama de flujo del sistema de destilación tradicional

Se diseñaron diagramas de flujo para representar la operación de ambos procesos. Estos diagramas incluyeron las corrientes de entrada y salida, así como los principales equipos involucrados, permitiendo visualizar las diferencias estructurales entre el sistema tradicional y el modificado.

La figura 17 muestra los principales equipos que integran el sistema de destilación tradicional, que incluye un destilador de cobre (A-110), con una capacidad de 150 litros; un horno de ladrillo (H-120), cuyas dimensiones son 1.33 m de largo, 1.31 m de ancho y 1.18 m de altura; un intercambiador de calor de cobre (I-130), con 2 pulgadas de diámetro y 1.80 m de longitud; y un intercambiador (I-140), también de cobre, con un diámetro de 1.5 pulgadas, conformado por cinco espirales.

El sistema opera con dos corrientes de agua independientes: una dirigida a la montera para la refrescada y otra a la pileta de enfriamiento o condensación. La falta de un sistema de recirculación hace que el consumo de agua sea elevado y el control térmico dependa completamente de la intervención manual del maestro mezcalero para realizar los cortes adecuadamente y que la eficiencia del proceso.

En el Cuadro 4 presenta el balance de materia y energía de la destilación tradicional (DT). El cuadro organiza las entradas y salidas por postura y resume los flujos másicos y energéticos, de modo que después pueda compararlos con el sistema modificado (DM).

En la DT se observó, que se emplean dos corrientes de agua de servicio: la corriente 5 aporta 120.16 L a la montera (A-110) y la corriente 6 entrega cerca de 4,100 L al sistema de enfriamiento de la pileta (I-140). El consumo de leña en la destilación tradicional sin recirculación fue de 26.94 kg por postura.

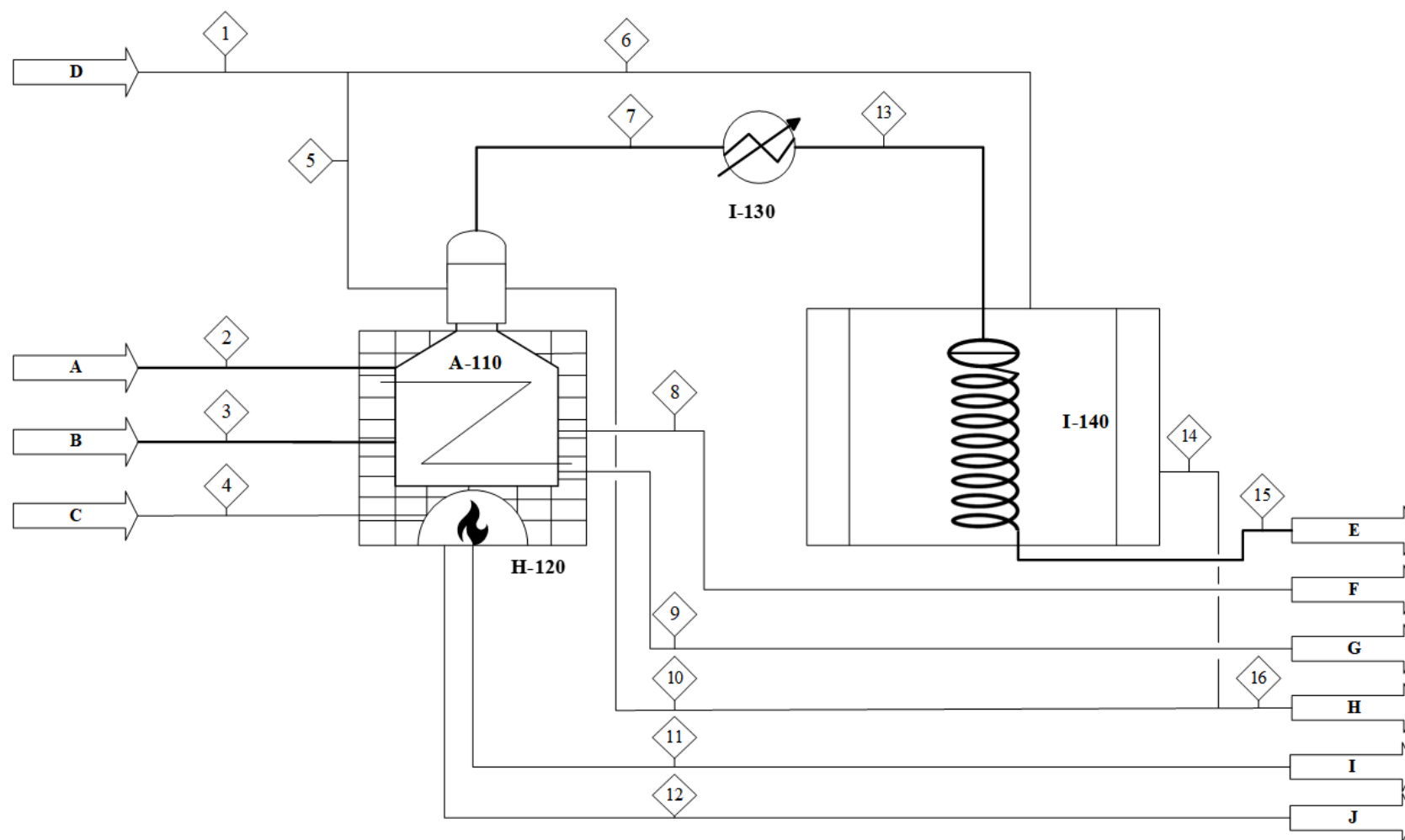


Figura 17. Diagrama de flujo del proceso de destilación tradicional.

A: Bagazo, B: Guarape, C: Leña, D: Agua de servicio, E: Mezcal, F: Residuo de bagazo, G: Vinazas, H: Agua residual, I: Cenizas y J: Gases de combustión.

Cuadro 4. Balance de materia y energía de la destilación tradicional.

	Agua de servicio	Bagazo	Guarapo	Leña	Agua de servicio	Agua de servicio	Vapor	Residuo de bagazo	Vinazas	Agua residual	Cenizas	Gases de combustión y carbón	Vapor	Agua residual	Mezcal	Agua residual
Propiedad	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Masa (kg)	4220160	92.57	25.20	26.94	120160	4100000	12.12	68.64	36.99	120160	0.81	26.13	12.12	4100000	12.12	4220160
Fracción agua (kg · kg ⁻¹) *	1	0.97	0.97	0.3	1	1	0.5	1.0	0.97	1	—	—	0.54	1	0.538	1
Fracción sólidos solubles totales (kg · kg ⁻¹) *	—	0.03	0.03	0.8	—	—	0.2	0.03	0.03	—	—	—	0.16	—	0.157	—
Contenido de alcohol (% v/v)	—	13.3	13.3	—	—	—	46.2	11	11	—	—	—	45.2	—	46.2	—
Densidad (kg · m ⁻³)	1000	1019.89	1004.1	800	1000	1000	935.5	350	1050	1000	350	0.49	935.5	1000	935.5	1000
Temperatura (°C)	20	20	20	20	20	20	88.2	90	90	82.9	20	400	88.2	25.8	22.51	27.42
Presión (kPa)	83.8	83.8	83.8	83.8	83.8	83.8	65.8	83.8	83.8	83.8	83.8	83.8	65.75	83.8	83.8	83.8
Calor específico (kJ · kg ⁻¹ · °C ⁻¹)	4.18	1.91	2.42	1.40	4.18	4.18	2.86	—	—	4.18	—	1.05	2.86	4.18	2.86	4.18
Entalpía específica líquido (kJ · kg ⁻¹)	83.6	—	—	—	83.6	83.6	—	—	—	346.5	—	—	—	107.8	64.4	114.62
Entalpía específica vapor (kJ · Kg ⁻¹)	—	—	48.4	—	—	—	252.60	—	—	—	—	—	252.6	—	—	—

Diagrama de flujo del sistema de destilación modificada

La Figura 18 muestra los equipos que integran el sistema de destilación modificado, el cual incluye un sistema de recirculación de agua. Los componentes principales son el destilador de cobre (A-110), el horno de ladrillo (H-120), una bomba hidráulica (B-150), un intercambiador de calor de cobre (I-140) de 2 pulgadas de diámetro y 1.80 m de longitud, y otro intercambiador de calor (I-150) de 1.5 pulgadas de diámetro, con cinco espirales.

El sistema de recirculación permite que el agua de la pileta se bombee hacia los intercambiadores de calor para enfriar el destilado, eliminando así la necesidad de la corriente 5 de agua de servicio, anteriormente utilizada como agua de servicio para la montera (A-110), con un aporte de 120.16 litros. En su lugar, se aprovecha el flujo de la corriente 6, que suministra aproximadamente 4,100 litros al sistema de enfriamiento de la pileta (I-140). Esta misma agua es recirculada hacia la montera y posteriormente regresa a la pileta o cisterna, estableciendo un flujo continuo.

El balance de materia y energía (Cuadro 5) correspondiente al proceso de destilación modificado, se le integró un sistema de recirculación de agua. Este balance cuantifica los flujos de entrada y salida del sistema, permitiendo evaluar el efecto de la instrumentación en el consumo de recursos y la distribución energética del proceso.

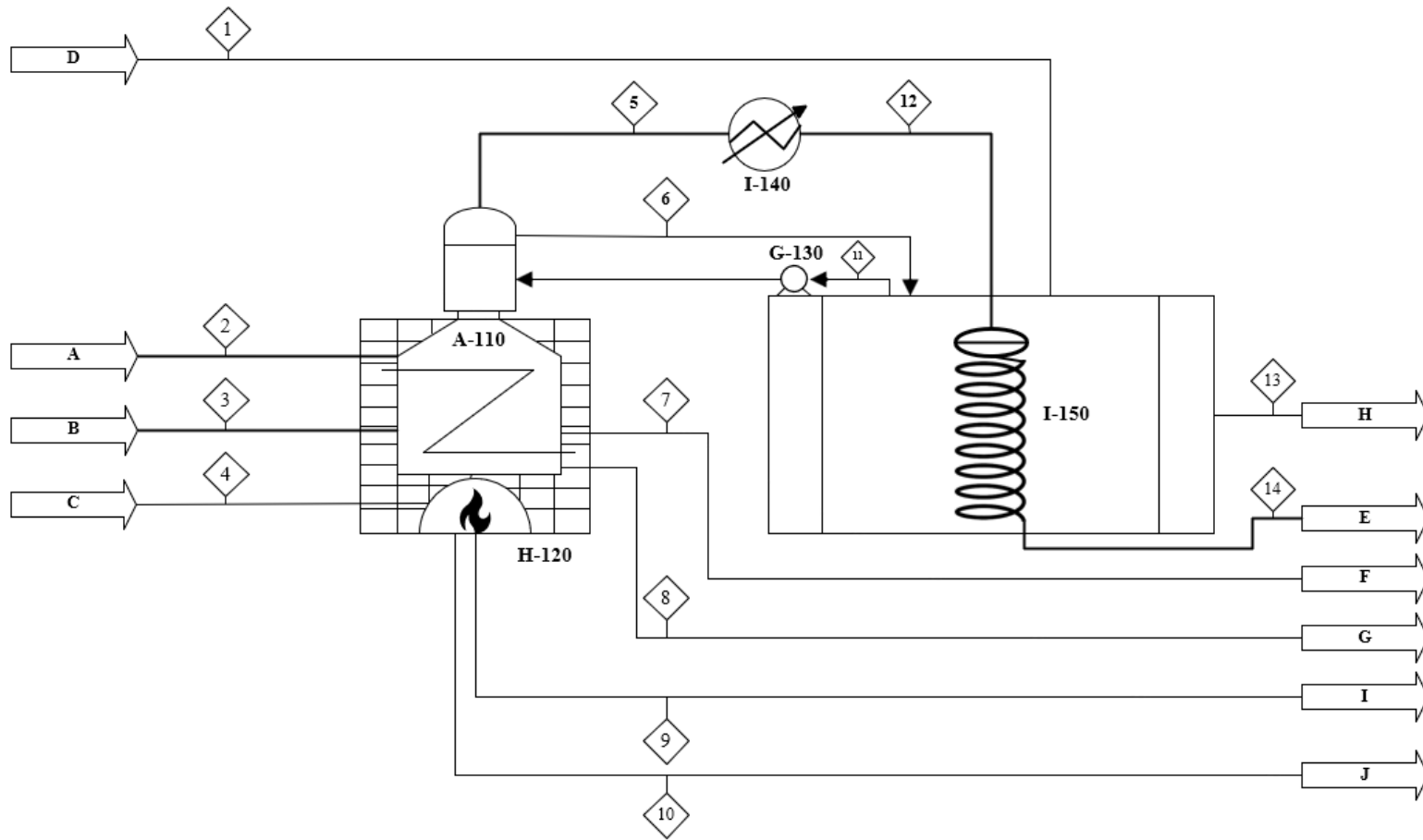


Figura 18. Diagrama de flujo del proceso de destilación modificado.

A: Bagazo, B: Guarape, C: Leña, D: Agua de servicio, E: Mezcal, F: Residuo de bagazo, G: Vinazas, H: Agua residual, I: Cenizas y J: Gases de combustión.

Cuadro 5. Balance de materia y energía del proceso de destilación modificada.

	Agua de servicio	Bagaz o	Guara pe	Leña	Vapor	Agua de servicio	Residuo de bagazo	Vinazas	Cenizas	Gases de combust ión	Agua de servicio	Vapor	Agua residual	Mezcal
Propiedad	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Masa (kg)	4100000	95.9	25.1	22.09	15.92	47740	71.09	32.42	0.66	21.43	47740	15.92	4100000	15.92
Fracción agua (kg · kg ⁻¹) *	1	0.97	0.97	0.25	0.53	1	0.98	0.98	—	—	1	0.53	1	0.53
Fracción sólidos solubles totales (kg · kg ⁻¹) *	0	0.03	0.03	0.75	933.9	0	0.02	0.02	—	—	0	933.9	0	933.9
Contenido de alcohol (% v/v)	0	9.3	9.3	—	47.1	0	9.1	9.1	—	—	0	47.1	0	47.1
Densidad (kg · m ⁻³)	1000	1019.9	1004.1	800	925.3	1000	657.06	657.06	350	0.49	1000	925.3	1000	925.3
Temperatura (°C)	20	20	20	20	88.2	25.5	90	90	20	400	25.5	88.2	20	22.71
Presión (kPa)	83.8	83.8	83.8	83.8	77.5	83.8	83.8	83.8	83.8	83.8	83.8	77.5	83.8	83.8
Calor específico (kJ · kg ⁻¹ · °C ⁻¹)	4.18	1.91	2.42	1.4	2.86	4.18	—	—	—	1.05	4.18	2.86	4.18	2.86
Entalpía específica líquido (kJ · kg ⁻¹)	83.6	—	—	—	—	106.59	—	—	—	—	106.59	—	83.6	64.95
Entalpía específica vapor (kJ · Kg ⁻¹)	—	—	48.4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Consumo y ahorro de agua en los procesos de destilación tradicional y modificado

La implementación del sistema de recirculación con control de temperatura permitió disminuir el consumo de agua en el proceso de destilación artesanal.

Cuadro 6. Consumo de agua entre los procesos de destilación tradicional y modificado.

	Destilación Tradicional (DT)	Destilación Modificado (DM)
Masa entrada a proceso (kg)	117.8	121.0
Volumen de agua requerida por lote (L)	4220.2	3979.8
Litros de agua/kg de maguey (L)	35.8	32.9
Volumen de agua ahorrado/kg de maguey (L)	0	2.9
Volumen de agua ahorrado/Lote (L)	0	355.2
Volumen de agua ahorrado/día (L)	0	1421.0

Los datos muestran una reducción en el consumo de agua al implementar el sistema de recirculación de agua en el proceso de destilación. En comparación con el proceso tradicional, se registró un ahorro de 1421 L de agua por día considerando que se hacen 4 posturas diarias. Este ahorro es importante para palenques ubicados en regiones rurales con disponibilidad limitada de agua. Además, iniciativas como la recuperación de calor y reutilización de agua en micro destilerías demuestran que estos esquemas pueden elevar la eficiencia eco-productiva y reducir el consumo hídrico del proceso, especialmente ahorros de agua y energía de entre el 13 % y 55 % por litro de alcohol puro producido (Schestak et al., 2023).

Consumo de leña por postura en la destilación tradicional y modificada

En la DM el consumo de leña disminuyó de 26.94 a 22.09 kg por postura (−4.85 kg; −18 %). Aunque el efecto es moderado por postura, con 4 posturas/día equivale a 19.4 kg menos diarios, lo que sugiere un ahorro operativo y potencial reducción de emisiones.

En el cuadro 7, se muestra la energía necesaria por el proceso de destilación y la cantidad real que se suministra, se confirma pérdidas de energía considerables por lo que se observa una baja eficiencia.

Cuadro 7. Requerimiento energético del proceso de destilación tradicional.

Energía requerida	Abreviatura	kJ
Energía suministrada	Q_{sum}	519,376.26
Energía útil	$Q_{útil}$	30,855.62
Perdidas de energía contabilizadas		kJ
Montera	Q_{mon}	37,490.16
Turbante	Q_{turb}	6,463.84
Serpentín	Q_{serp}	45,387.80
Eficiencia térmica	η	5.94%

3.3.2 Resultados del comportamiento de compuestos fisicoquímicos

El perfil sensorial del mezcal está determinado por compuestos volátiles, como alcoholes, ésteres, aldehídos y ácidos orgánicos. Sus proporciones varían según la especie de agave, condiciones del ambiente y las prácticas de producción. Durante la destilación, estos compuestos se separan del mosto en función de su punto de ebullición, su solubilidad en agua o alcohol y por el tipo de equipo utilizado. Esta etapa es fundamental ya que, hacer los cortes adecuados del destilado, permite controlar los compuestos exigidos por la NOM-070-SCFI-2016 (Balcerek et al., 2017; Cancino et al., 2022; Sánchez et al., 2025; Vera-Guzmán et al., 2018; Xiang et al., 2020).

Se analizaron los principales compuestos fisicoquímicos en diferentes fracciones del destilado: punta, cordón y shishe, también conocido como cabeza, corazón y cola, durante el tiempo de destilación, utilizando dos enfoques: la destilación tradicional (DT) y la destilación modificada (DM). Los siguientes gráficos muestran cómo varían los compuestos fisicoquímicos en cada fracción y permiten comparar el comportamiento entre ambos métodos.

Las líneas punteadas negras indican los cortes del destilado; las líneas punteadas naranjas corresponden a los momentos en que se realizaron refrescadas de forma manual a la montera durante la destilación tradicional ($R1_{DT}$ y $R2_{DT}$); y la línea punteada azul representa la refrescada automática aplicada mediante el sistema de recirculación de agua en el proceso modificado ($R1_{DM}$).

Comportamiento del contenido de alcohol en los procesos de destilación

En la Figura 19 muestra la variación del contenido de alcohol durante el proceso de la DT y DM. A continuación, se describe el comportamiento en cada proceso.

Destilación tradicional (DT)

El contenido de alcohol aumentó rápidamente desde alrededor del 15 % v/v al inicio hasta cerca del 55–57 % durante la fracción punta (60–70 minutos). Posteriormente, se observó una caída pronunciada tras la primera refrescada ($R1_{DT} = 80$ min), seguida de un repunte y una segunda disminución después de la segunda refrescada ($R2_{DT} = 140$ min). Estas variaciones se relacionan con los cambios bruscos de temperatura en la montera y con el control manual del enfriamiento, que generan un proceso menos estable. Al finalizar el proceso, en la fracción shishe, el grado alcohólico disminuyó hasta valores de 20–25 % v/v, mientras la temperatura de evaporación alcanzó cerca de 90–92 °C. Este comportamiento refleja una destilación más irregular, en la que los cortes son menos precisos y puede haber un arrastre parcial de fracciones de punta y shishe, afectando la uniformidad del destilado.

Destilación modificada (DM)

El proceso inició con un comportamiento similar, pero el control automático de la recirculación de agua permitió mantener la temperatura constante durante la fracción de cordón. El contenido de alcohol se mantuvo entre 55 y 60 % v/v de manera estable por un periodo más prolongado (70–150 minutos), sin caídas bruscas como en DT. Tras la refrescada automática ($R1_{DM} = 140$ min), el valor se conservó cercano a 56–58 %, descendiendo gradualmente hasta 30–35 % al

final del proceso. La estabilidad térmica en DM redujo los cambios abruptos en el equilibrio vapor-líquido, lo que permitió cortes más precisos y una separación más limpia entre fracciones.

La DM mantuvo un cordón más amplio y estable (55–60 % v/v entre 70–150 min) y mostró menores oscilaciones que la DT, donde las refrescadas manuales provocaron caídas y repuntes del grado alcohólico (55 % a 40 % tras R1_DT) y un descenso más abrupto hacia la fracción shishe. Aunque la diferencia observada en el contenido alcohólico no fue significativa ($p = 0.066$), el comportamiento favorece a DM porque hay un equilibrio vapor-líquido controlado por la recirculación de agua y la operación sobre la composición del destilado (Balcerek et al., 2017; Xiang et al., 2020).

Un grado alcohólico estable durante el cordón permite realizar cortes más consistentes en la destilación, reduce el arrastre de puntas, que contienen compuestos volátiles de baja temperatura de ebullición, y también evita el exceso de shishe, donde se concentran alcoholes superiores y sustancias pesadas. Como resultado, el destilado presenta un perfil sensorial más equilibrado y uniforme, con mejor definición de aromas y sabores característicos del mezcal (Vera-Guzmán et al., 2018).

Además, un manejo adecuado de la temperatura mejora la separación del metanol, que se concentra principalmente en las puntas, y reduce la formación de furfural asociado a sobrecalentamiento o tiempos prolongados de destilación. Estas condiciones ayudan a mantener los valores dentro de los límites establecidos por la NOM-070-SCFI-2016, que regula la concentración de compuestos como metanol y furfural en el mezcal (Balcerek et al., 2017; Secretaría de economía, 2017; Vera-Guzmán et al., 2018; Xiang et al., 2020).

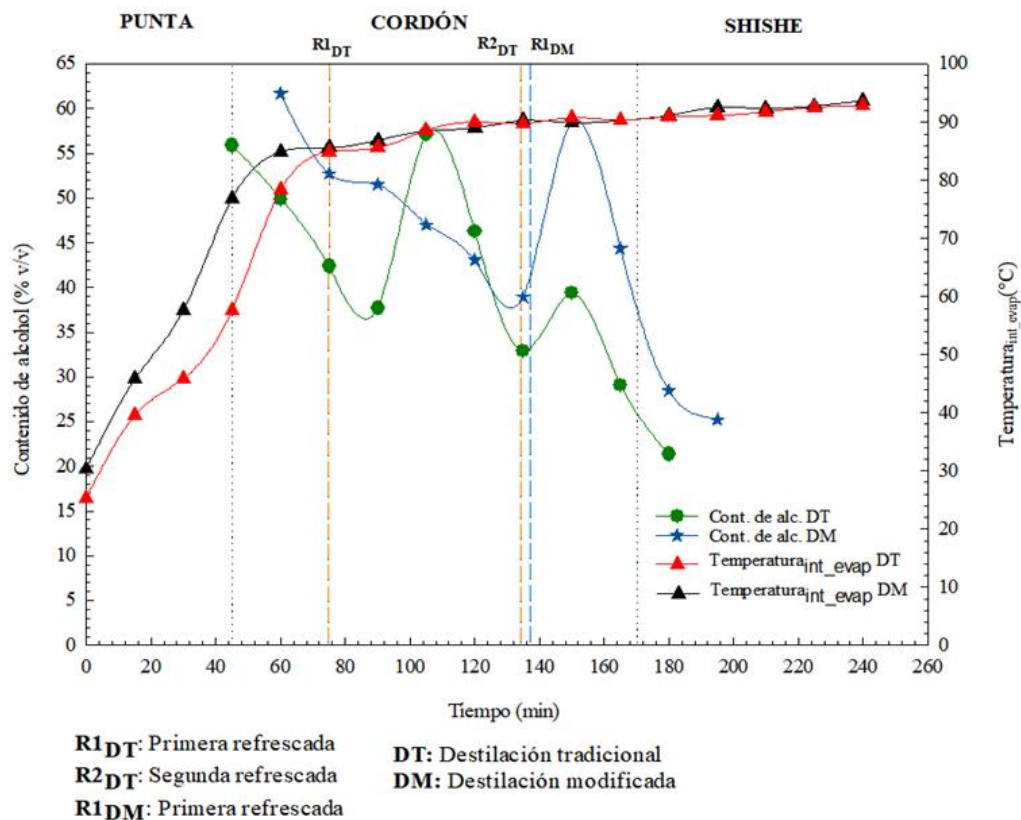


Figura 19. Variación del contenido de alcohol en el destilado de mezcal durante los procesos de DT y DM.

Comportamiento de la densidad en los procesos de destilación

La Figura 20 muestra la variación de la densidad del destilado en la DT y DM. A continuación, se describe el comportamiento en cada proceso.

Destilación tradicional (DT)

La densidad del destilado presentó una tendencia inversa al contenido alcohólico. En la fracción punta, los valores fueron bajos, alrededor de $910\text{--}930\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, aumentando de forma irregular conforme avanzó la destilación. Después de la primera refrescada ($R1_{DT} = 80\text{ min}$) se observó un incremento leve, seguido de una caída y una nueva subida posterior a la segunda refrescada ($R2_{DT} = 140\text{ min}$). Estas fluctuaciones se relacionaron con los cambios de temperatura en la montera justo antes y después de colocar la refrescada. En la fracción shishe, la

densidad alcanzó valores cercanos a $970 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, lo que indica un aumento de agua y compuestos pesados, como alcoholes superiores y ácidos orgánicos (Cancino et al., 2022; Vera-Guzmán et al., 2018).

Destilación modificada (DM)

La densidad aumentó de forma gradual y se mantuvo estable durante el cordón ($965\text{--}970 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$), sin las oscilaciones observadas en DT. Conforme avanzó el proceso hacia la fracción final del destilado (shishe), el aumento fue suave, lo que indicó una transición controlada entre las fracciones del destilado. Esta estabilidad se atribuyó al control automático de recirculación de agua, que permitió mantener una temperatura más constante en la montera y un equilibrio vapor-líquido uniforme, favoreciendo cortes más precisos y una mejor separación de las fracciones, así como se ha señalado para destilaciones por lotes en bebidas espirituosas (Balcerek et al., 2017; Cancino et al., 2022).

Se observó que la DM mantuvo una densidad más uniforme en la fracción cordón y una transición más gradual hacia la fracción shishe, mientras que la DT presentó variaciones abruptas provocadas por el manejo manual de la temperatura. Aunque la diferencia entre procesos no fue estadísticamente significativa ($p = 0.066$), la tendencia favoreció a la DM, mostrando un proceso más estable.

Una densidad estable durante el cordón indica que la mezcla etanol-agua se mantuvo constante, lo que permitió mantener una composición equilibrada y un perfil aromático más uniforme. En cambio, las fluctuaciones de densidad observadas en la DT pueden generar una mezcla irregular de fracciones, alterando el balance de compuestos volátiles, lo que se traduce en destilados menos uniformes y con posibles desviaciones sensoriales, como notas ásperas o pesadas (Balcerek et al., 2017; De León-Meza, 2015; Cancino et al., 2022).

Este manejo permitió concentrar y descartar adecuadamente las puntas, donde suele acumularse el metanol, y evitar sobrecalentamientos o tiempos excesivos que favorecen la formación de furfural en la fracción shishe. De esta forma, el

proceso operó con mejores condiciones para cumplir con los límites establecidos por la NOM-070-SCFI-2016, que regula el contenido de metanol, furfural y la graduación alcohólica declarada. Estos resultados coinciden con lo reportado por (Lachenmeier et al., 2010) sobre seguridad en bebidas espirituosas, señala que mantener cortes adecuados reduce el riesgo de presencia de metanol en el producto final.

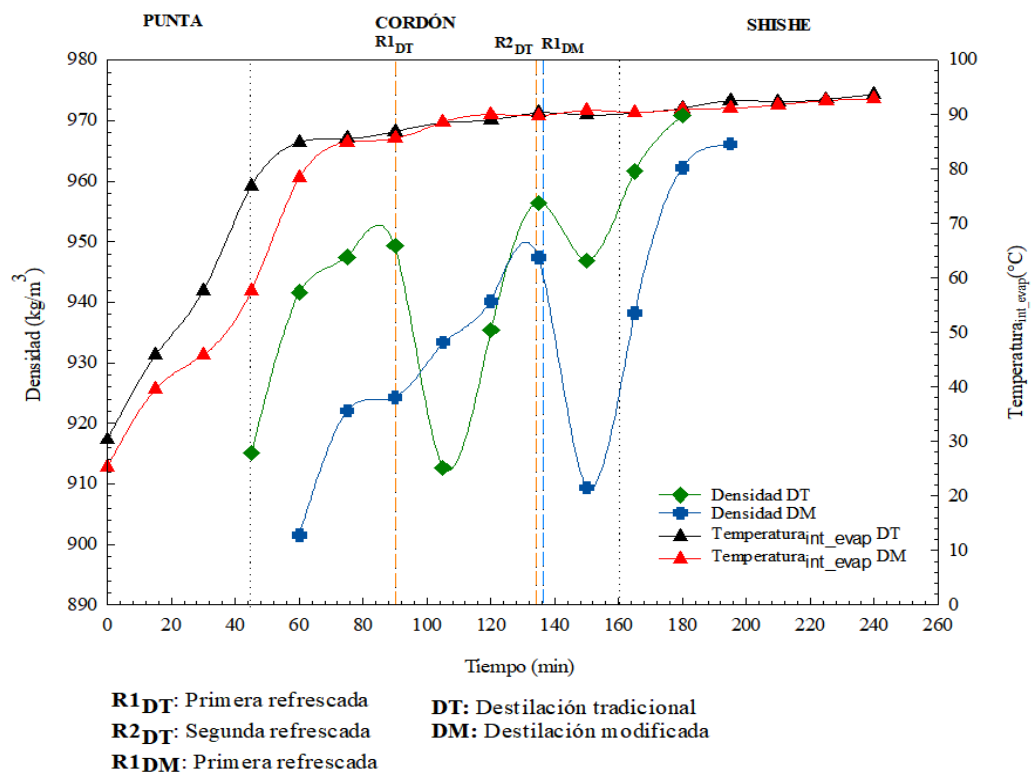


Figura 20. Variación de la densidad del destilado durante la DT y DM.

Comportamiento de los Sólidos Solubles Totales en los procesos de destilación

La Figura 21 muestra la variación de los sólidos solubles totales en el destilado durante la DT y DM. A continuación, se describe el comportamiento en cada proceso.

Destilación tradicional (DT)

Los sólidos solubles totales (TSS) presentaron valores bajos al inicio, entre 9 y 10 %, los cuales fueron incrementando de forma constante durante la fracción punta hasta alcanzar un 18–19 % a los 60–70 min de proceso. Este aumento está relacionado con la concentración de azúcares y otros compuestos solubles que son arrastrados por el vapor al inicio de la destilación. A medida que avanzó el proceso, en la fracción cordón se observaron descensos y aumentos notorios de los SST, coincidiendo con las refrescadas manuales (R1_DT y R2_DT). Finalmente, en la fracción shishe los SST disminuyeron hasta los 8–10 %, indicando una composición más diluida y con menor concentración de compuestos solubles (Lorenzo-Santiago et al., 2023).

Destilación modificada (DM)

Al inicio de la destilación, los valores de sólidos solubles totales (TSS) en el destilado fueron de 9–10 % y aumentaron gradualmente durante la fracción punta hasta alcanzar 17–18 % a los 70–80 min de proceso. Este incremento se atribuye al transporte de compuestos no volátiles desde el mosto hacia el condensado, principalmente azúcares, glicerol y ácidos orgánicos, provocado por las altas temperaturas, que favorecen la formación de microgotas responsables del transporte de compuestos no volátiles. Conforme avanzó el proceso, en la fracción cordón los SST se mantuvieron casi constantes (15 y 17 %), debido al control térmico aplicado. Finalmente, en la fracción shishe los SST disminuyeron hasta 10–11 %, indicando una mezcla más diluida y con menor proporción de compuestos solubles, asociada al descenso del contenido alcohólico en la fracción final de la destilación (Balcerek et al., 2017; Lorenzo-Santiago et al., 2023).

Los resultados mostraron que el comportamiento de los SST fue similar en ambos procesos. No se encontraron diferencias significativas entre la destilación tradicional y la modificada ($p = 0.216$), lo que indica que el control térmico no alteró de manera notable la concentración de sólidos solubles. La estabilidad de

los SST contribuye a mantener la consistencia y uniformidad del producto, ya que estos compuestos están relacionados con el cuerpo, dulzor y textura del mezcal, atributos sensoriales que dependen de la concentración de azúcares y sustancias no volátiles (García-Soto et al., 2011; Lorenzo-Santiago et al., 2023).

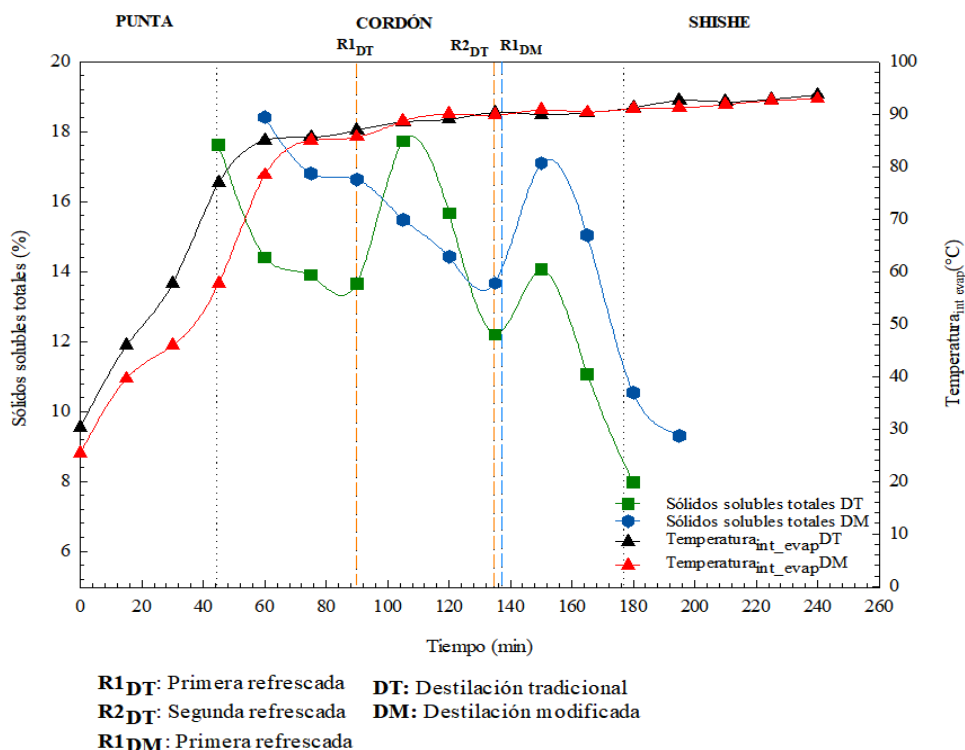


Figura 21. Comportamiento de los Sólidos solubles totales en el destilado durante el proceso de DT y DM.

Comportamiento de metanol en los procesos de destilación

La Figura 22 muestra la variación del metanol en el destilado durante la DT y DM. A continuación, se describe el comportamiento en cada proceso.

Destilación tradicional (DT)

Al inicio del proceso, el valor de metanol fue de 200–250 mg/100 mL a.a., luego presentó un aumento gradual en la fracción punta (40–60 min), alcanzando valores máximos de 350–370 mg/100 mL a.a. (100–120 min) al final de la fracción de cordón, y se mantuvo elevado en la fracción de shishe. Estos cambios bruscos se relacionan con las refrescadas (R1_DT y R2_DT), que provocaron fluctuaciones de temperatura y alteraron el equilibrio entre las fases líquido-

vapor, generando las variaciones en la concentración de metanol. Este comportamiento coincide con lo reportado por Cancino et al. (2022), quienes observaron que el metanol aumenta en las fracciones finales de la destilación cuando la concentración de etanol desciende por debajo de 20 % v/v. Esto ocurre porque el metanol tiene mayor afinidad con el agua, lo que favorece su arrastre junto con otros compuestos de bajo peso molecular hacia la fracción shishe. Así mismo, este comportamiento se debe a que el metanol es más volátil que el etanol debido a su bajo punto de ebullición, y coincide con lo reportado por (Sánchez et al., 2025), quienes señalan que el metanol se encuentra principalmente en la fracción punta y en menor medida en la fracción shishe. Por lo que es recomendable realizar cortes precisos y anticipar el fin de la fracción cordón cuando el grado alcohólico del destilado cae debajo de 20 % v/v, para minimizar el arrastre de metanol en el cordón y garantizar que el mezcal cumpla con el límite de 300 mg/100 mL a.a. establecido por la NOM-070-SCFI-2016.

Destilación modificada (DM)

Al inicio de la fracción punta, la concentración de metanol se mantuvo entre 100–150 mg/100 mL a.a., con un incremento moderado hacia el cierre. En la fracción cordón, el compuesto aumentó, pero se mantuvo estable dentro del intervalo de 200–260 mg/100 mL a.a.. A los 140 min se aplicó la recirculación de agua para enfriar, lo que restableció el equilibrio líquido–vapor y evitó incrementos abruptos de metanol. Al final del proceso, en la fracción shishe, la concentración volvió a aumentar cuando el contenido alcohólico del chorro disminuyó por el agotamiento de etanol en el mosto; este comportamiento se asoció con la mayor proporción de agua en la fracción shishe y, en consecuencia, con un mayor arrastre de metanol. Durante la fracción punta y cordón los valores permanecieron por debajo de 300 mg/100 mL a.a., en cumplimiento del límite establecido por la NOM-070-SCFI-2016 para el producto final, lo cual coincide con estudios de destilaciones con control térmico que reportan estabilidad del metanol en la fracción de cordón (Balcerek et al., 2017; Cancino et al., 2022).

La destilación modificada (DM) mostró valores de metanol más estables y sin aumentos bruscos, con una diferencia estadísticamente significativa ($p = 0.0205$). En DT se observaron fluctuaciones provocadas por las refrescadas manuales, mientras que en DM el control térmico por recirculación mantuvo el proceso uniforme. Esto permitió que se pudieran hacer cortes más precisos, menor arrastre de fracciones indeseables al cordón y menor variabilidad en la destilación. Además, la DM permitió mantener el metanol dentro del límite de 300 mg/100 mL a.a. establecido por la NOM-070-SCFI-2016, lo que la convierte en una alternativa segura y confiable en comparación con la DT.

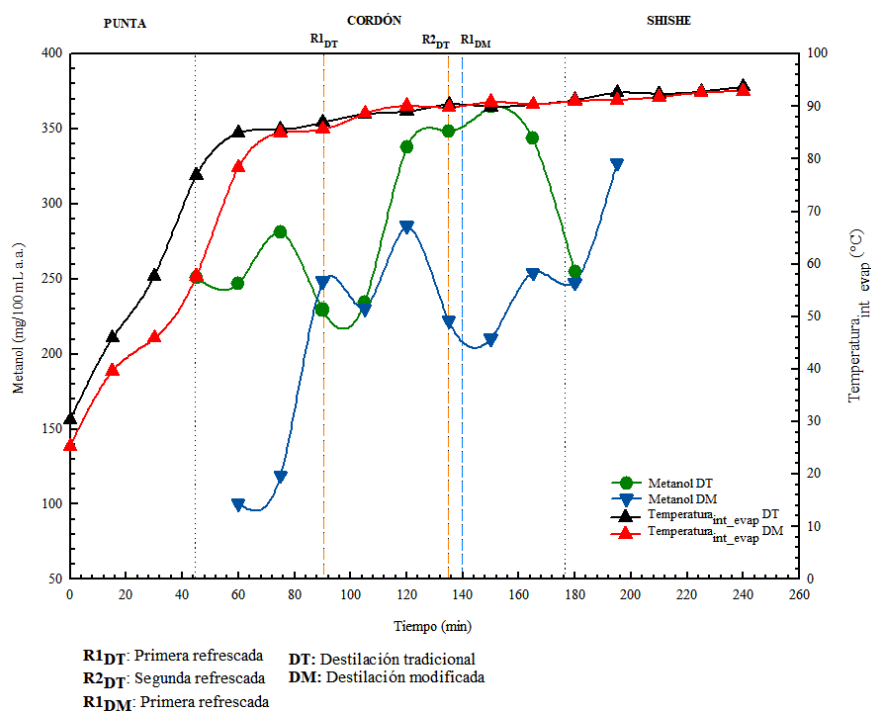


Figura 22. Comportamiento de metanol durante la DT y DM.

Comportamiento de furfural en los procesos de destilación

La Figura 23 muestra la variación de furfural en el destilado durante la DT y DM. A continuación, se describe el comportamiento en cada proceso.

Destilación tradicional (DT)

Al inicio de la fracción punta, el furfural presentó valores de 0–2 mg/100 mL a.a. Posteriormente mostró un incremento a partir de los 60 min, lo que correspondió

al inicio de la fracción de cordón, alcanzando valores de 3–5 mg/100 mL a.a; hacia el final del cordón, se observaron valores de 10–22 mg/100 mL a.a., con fluctuaciones relacionadas con las refrescadas manuales aplicadas en este proceso (R1_DT y R2_DT). Finalmente, en la fracción shishe el furfural alcanzó 30–35 mg/100 mL a.a., lo cual concuerda con reportes previos que indican que tiende a concentrarse en la fracción por su baja volatilidad y mayor afinidad por la fase líquida, y que además co-destila junto con compuestos de alto punto de ebullición. Así mismo, al disminuir el porcentaje de etanol en las fracciones finales, el equilibrio vapor-líquido favorece su presencia en el destilado tardío (García-Soto et al., 2011; Sánchez et al., 2025). Este comportamiento también se explica porque el furfural se forma durante la descomposición térmica de carbohidratos residuales del bagazo de agave, especialmente a temperaturas elevadas (Cancino et al., 2022).

Destilación modificado (DM)

El furfural presentó valores de 0–1 mg/100 mL a.a. en la fracción punta y se mantuvo entre 1–4 mg/100 mL a.a. durante el cordón. A los 140 min se aplicó la refrescada automática por recirculación de agua (R1_DM), lo que mantuvo la temperatura controlada y evitó incrementos del compuesto. Solo en la fracción shishe (colas) se registró un aumento hasta 30–32 mg/100 mL a.a. Este incremento en las fracciones finales se presenta por su alto punto de ebullición (161 °C) y mayor afinidad por la fase acuosa, por lo que tiende a concentrarse al final del proceso (Cancino et al., 2022).

El furfural se concentró principalmente en la fracción shishe en ambos procesos, sin diferencias significativas entre DT y DM ($p = 0.688$); sin embargo, la DT presentó picos abruptos durante la fracción de cordón, donde se alcanzaron concentraciones de 10 a 22 mg/100 mL a.a., superando el límite establecido por la NOM-070-SCFI-2016 de 5 mg/100 mL. Estos incrementos se atribuyen a las refrescadas manuales, que provocan fluctuaciones térmicas y favorecen la formación de compuestos indeseables. Mientras que, la DM mantuvo valores más bajos por el control térmico, sin exceder el límite normativo. Una alta

concentración de furfural en el destilado se asocia con notas amargas y asperezas, que pueden afectar negativamente la calidad del destilado (García-Soto et al., 2011).

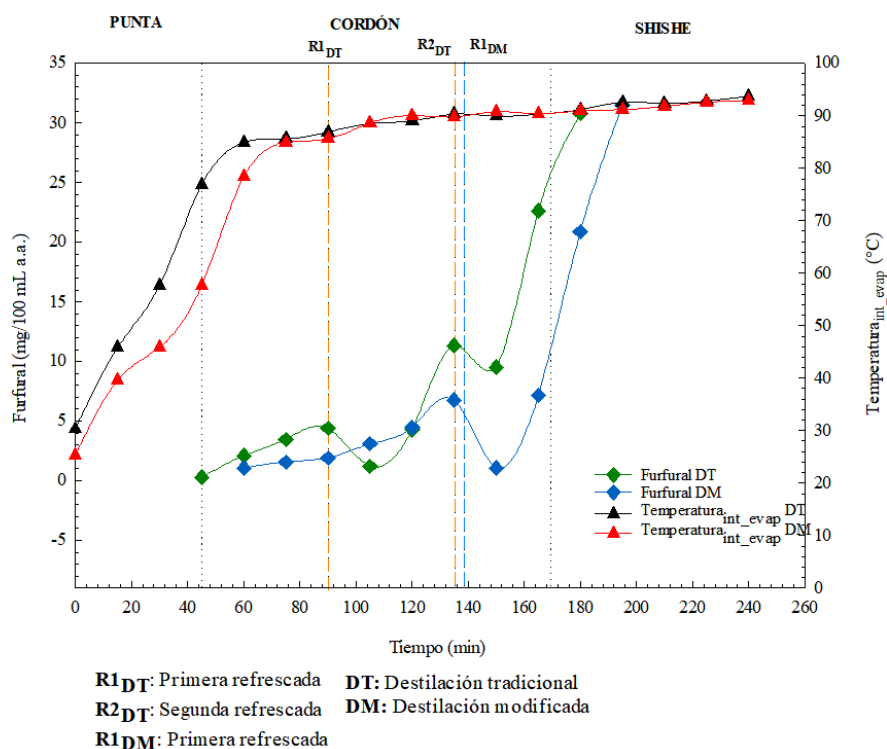


Figura 23. Comportamiento de furfural en el destilado durante la DT y DM.

En la figura 24 se observaron mayores fluctuaciones en el caudal del destilado en la destilación tradicional (DT), con caídas abruptas asociadas a los refrescados manuales. Mientras que, la destilación modificada (DM) mostró un caudal más constante, debido al uso de recirculación de agua automático. Esta estabilidad en el proceso generó cortes más definidos de las fracciones (punta, cordón y shishe), lo cual facilita la toma de decisiones durante los cortes y reduce el arrastre de compuestos indeseables de las colas. Lo anterior coincide con lo reportado por Cancino et al. (2022), quienes indican que el caudal es un indicador clave para distinguir fracciones en destilación artesanal, ya que su

comportamiento está directamente relacionado con la energía aplicada y composición del destilado.

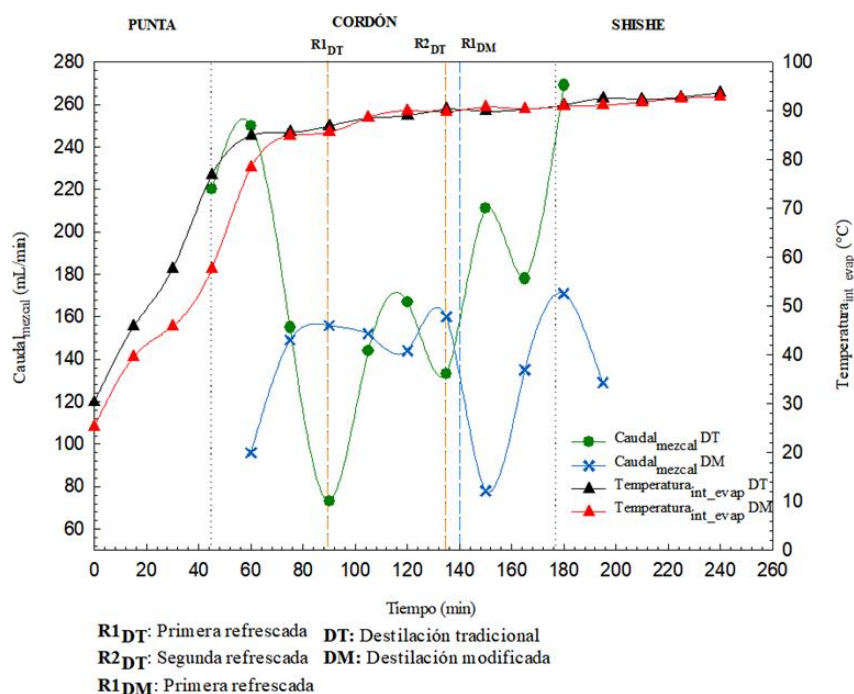


Figura 24. Comportamiento del flujo de mezcal durante la DT y DM.

Análisis de correlación de Pearson

La figura 25 presenta una matriz de correlación de Pearson de las variables fisicoquímicas de la destilación tradicional (DT). Se encontraron correlaciones significativas entre Alcohol (Alc) con Densidad (Dens) ($r = -0.993$), Alcohol (Alc) con Sólidos Solubles Totales (TSS) ($r = 0.986$), Alcohol (Alc) con Furfural (Fur) ($r = -0.793$) y una correlación baja entre Alcohol y Metanol (Met) ($r = -0.132$).

El Alcohol está relacionado de forma inversa con la Densidad. Esto significa que conforme avanza la destilación, el porcentaje de etanol en el destilado disminuye y la densidad tiende a aumentar debido a la mayor presencia de agua y compuestos menos volátiles (Perry & Green, 2019). El etanol posee una densidad menor ($0.789 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ a 20°C) en comparación con el agua ($1.0 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$), por lo que una reducción en el contenido alcohólico se refleja directamente en un

incremento de densidad del destilado, tal como lo indican estudios de separación por arrastre térmico en bebidas alcohólicas artesanales como mezcal, tequila y pisco (García-Soto et al., 2011; Vera-Guzmán et al., 2018). De igual forma, en procesos de doble destilación por lotes y separación fraccionada, la fracción punta presenta mayor contenido alcohólico y menor densidad; por el contrario, la densidad aumenta en la fracción shishe (Danahy et al., 2018; Lachenmeier et al., 2010).

La asociación entre Alcohol y los Sólidos solubles totales se explica por el arrastre de compuestos del mosto fermentado durante la fase inicial de la destilación. El aumento de alcohol se acompaña de una cantidad moderada de solutos (azúcares residuales, aldehídos y ésteres) que contribuyen a los TSS (Cancino et al., 2022). Estos compuestos son arrastrados junto con el etanol debido a su relativa volatilidad, por lo que ambos tienden a disminuir conforme la destilación progresa hacia la fracción de shishe.

La correlación inversa de Alcohol y Furfural significa que durante la fracción punta y parte del cordón el destilado presenta un mayor contenido alcohólico y baja presencia de compuestos de degradación térmica como el furfural. Conforme avanza el proceso hacia la fracción de shishe, disminuye el porcentaje de alcohol debido a la menor volatilidad del etanol, mientras que el furfural tiende a aumentar debido a la descomposición térmica de azúcares residuales y pentosas presentes en el mosto (Xiang et al., 2020). El furfural se forma principalmente por reacciones de Maillard y degradación de hemicelulosas en condiciones de calentamiento prolongado, lo que explica su incremento en la fracción final del destilado (Hatta-Sakoda et al., 2024; Vera-Guzmán et al., 2018).

El Alcohol y Metanol presentaron una baja correlación, debido a que, el metanol se genera principalmente durante la fermentación por la desesterificación (desmetoxilación) de los grupos metilo de la pectina de las paredes celulares del agave, reacción catalizada por la pectin metilesterasa (PME) de origen microbiano y/o vegetal. Su concentración en el destilado depende más de la composición de la materia prima (especie y madurez del agave) y de las

condiciones de fermentación. Tiende a concentrarse en la fracción de punta debido a su menor punto de ebullición (64.7 °C) en comparación con el etanol (78.3 °C), pero su arrastre se mantiene de forma dispersa a lo largo del proceso (Blumenthal et al., 2021; Flores-Martínez et al., 2025). Por ello, aunque el alcohol disminuye conforme avanza la destilación, el metanol puede variar según las decisiones de corte y las condiciones térmicas aplicadas en cada postura (Flores-Martínez et al., 2025; Tian et al., 2022).

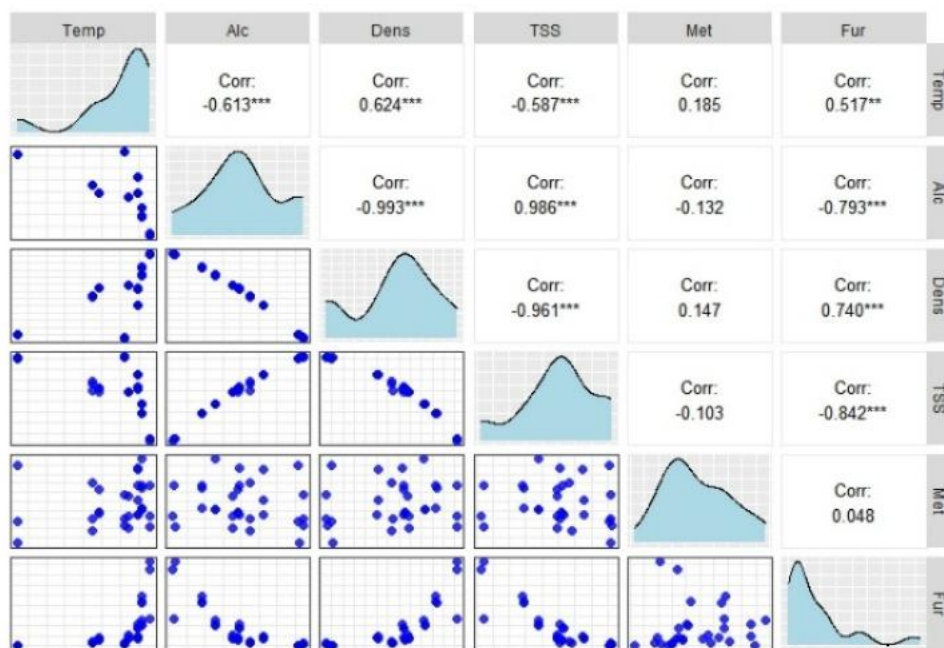


Figura 25. Diagrama de correlación de Pearson de las variables fisicoquímicas en el proceso de destilación tradicional (DT).

En la figura 26 presenta las correlaciones de las variables fisicoquímicas de la DT. Se encontró una alta correlación entre el Alcohol (Alc) y Densidad (Dens) ($r = -0.993$), Alcohol (Alc) y Sólidos solubles totales (TSS) ($r = 0.983$), Densidad (Dens) con Sólidos Solubles Totales (TSS) ($r = -0.961$), Furfural (Fur) con Alcohol (Alc) ($r = -0.884$) y una baja correlación entre Alcohol y Metanol (Met) ($r = -0.1554$).

Las relaciones de Alc–Dens, Alc–TSS y Dens–TSS conservan el mismo comportamiento presentado en DT; sin embargo, presentan menor dispersión, lo

que indica fraccionamiento un poco más estable. Además, los valores de las correlaciones con furfural y metanol aumentaron un poco (Alc–Fur y Alc–Met), lo que sugiere que, con la recirculación, el furfural y metanol aparecieron solo en la fracción shishe, reduciendo un poco un poco los valores en DT.

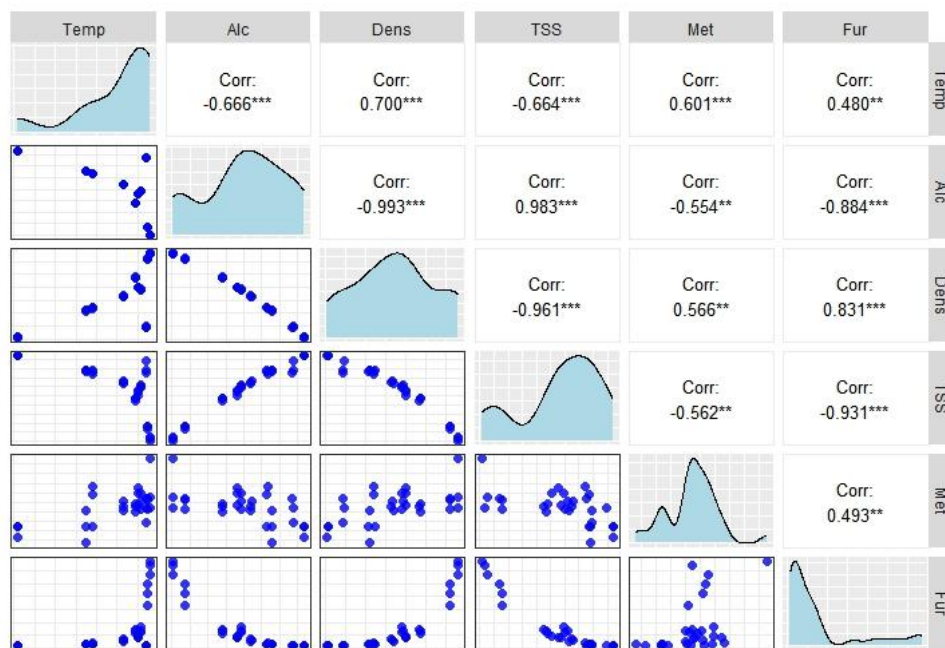


Figura 26. Diagrama de correlación de Pearson de las variables fisicoquímicas en el proceso de destilación modificado (DM).

Análisis de componentes principales (PCA)

La prueba de esfericidad de Bartlett arrojó un valor de ($p < 2.2 \times 10^{-16}$) en la DT y un valor ($p < 2.2 \times 10^{-16}$) en la DM, lo que significa que existe correlación significativa entre las variables fisicoquímicas.

El PCA mostró que los dos primeros componentes explican el 94.47 % de la variabilidad de los datos. El Componente Principal 1 (PC1) explicó el 77.16 % de la varianza y estuvo definido principalmente por variables como el alcohol (-0.50), la densidad (0.59) y los sólidos solubles totales (-0.50) y, en menor medida, con el furfural (carga de 0.45). Estos datos permiten ordenar las muestras según su comportamiento durante el proceso de destilación.

En el Cuadro 8 se muestran los coeficientes de contribución del PCA para las variables fisicoquímicas medidas en destilación tradicional (DT) y destilación modificada (DM). El PC1 representa el patrón de variación composicional común a ambos procesos (alcohol negativo y densidad/SST positivos), por lo que describe el comportamiento característico del proceso de destilación, tanto en DT como en DM. El PC2 explicó 17.31 % de la varianza y la variable principal que lo representa es el metanol con valor de (coeficiente = 0.965), lo que indica que su comportamiento es independiente de PC1, depende principalmente de las decisiones de corte y de las condiciones previas de fermentación.

Al comparar ambos procesos, la DM mostró una menor dispersión a lo largo de PC1, asociada a la mejor estabilidad del proceso en temperatura y caudal, y valores de PC2 más cercanos a cero, lo que sugiere cortes un poco más uniformes y controlados; mientras que la DT presentó mayor variabilidad del metanol (variable principal que lo representa) entre fracciones de punta y shishe.

Los componentes restantes (PC3, PC4 y PC5) tienen una contribución a la varianza, con menos del 6%, por lo que no se incluyeron en la interpretación del análisis.

Cuadro 8. Análisis de componentes principales de los parámetros fisicoquímicos del mezcal durante la destilación tradicional y modificado.

Variable	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
Alcohol	-0.5020221	0.07317286	-0.29526970	0.08896298	-0.80468686
Densidad	0.4935714	-0.03413002	0.45804929	-0.50873866	-0.535348737
Sólidos solubles totales	-0.5018985	0.12322656	-0.05715807	-0.81518797	0.255175636
Metanol	0.2215581	0.96475917	-0.14045875	0.02030442	0.003289087
Furfural	0.4509667	-0.21802713	-0.82462776	-0.26139407	-0.027483662

La figura 27 muestra un gráfico de PCA que representa la contribución de las variables a los dos primeros componentes principales (Dim1 y Dim2); el primero explicó el 77.2 % de la variabilidad y el segundo el 17.3 %, sumando un total de 94.5 %, por lo que el plano representó adecuadamente la dispersión de los datos. El componente 1 separó a las variables Alcohol y Sólidos solubles totales; se observa una asociación fuerte positiva entre ellas, mientras que la densidad y furfural se correlacionaron entre sí en sentido opuesto en el componente 2. Esta

relación indica que un incremento en alcohol y sólidos solubles está relacionado con una menor presencia de densidad y furfural en el destilado. En cambio, el metanol se ubicó de manera independiente sobre Dim2, mostrando un comportamiento diferenciado respecto a las demás variables.

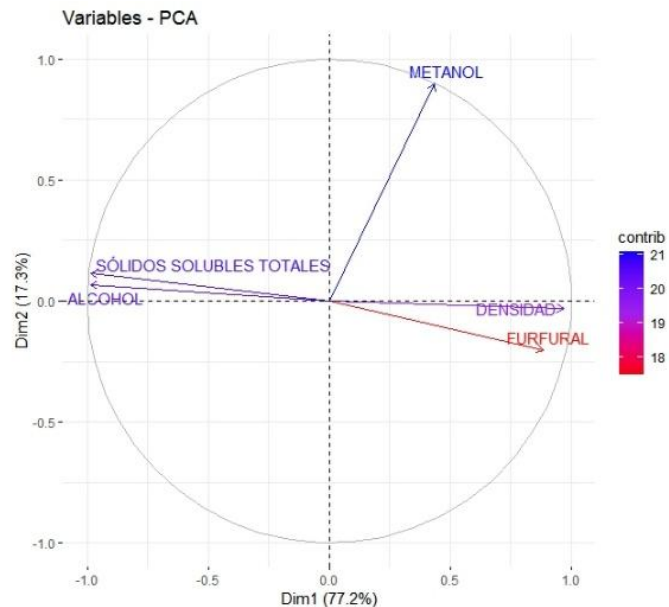


Figura 27. Gráfico de PCA de correlación de las variables fisicoquímicas del destilado de mezcal.

La Figura 28 presenta un gráfico de PCA del comportamiento de las variables fisicoquímicas en los procesos de DT y DM, en el cual se distingue la separación entre ambos procesos. Las muestras del proceso tradicional (DT) se agruparon hacia la zona derecha de Dim1 y mostraron mayor variabilidad en su distribución, caracterizadas por mayores valores de densidad y furfural, lo que coincide con evidencia de que temperaturas elevadas en etapas de tratamiento térmico o falta de control de calor favorecen la formación de compuestos furanos (como furfural) en mezcal (García-Soto et al., 2011). En cambio, las muestras obtenidas por el proceso modificado (DM se agruparon de forma un poco más compacta) y se asociaron con mayores niveles de Alcohol y Sólidos solubles totales. Además, estudios recientes muestran que el furfural tiende a aumentar hacia el final de la

destilación en procesos artesanales, siendo influido por los cortes de destilación y condiciones operativas (Cancino et al., 2022).

Finalmente, el metanol, aunque se proyectó como una variable discriminante independiente (Dim2), no se asoció claramente a ninguno de los dos procesos, lo que coincide con estudios que indican que, además de la destilación, factores como la especie de agave, las condiciones de fermentación y el tipo de equipo también determinan su presencia y concentración (Cancino et al., 2022; Sánchez et al., 2025).

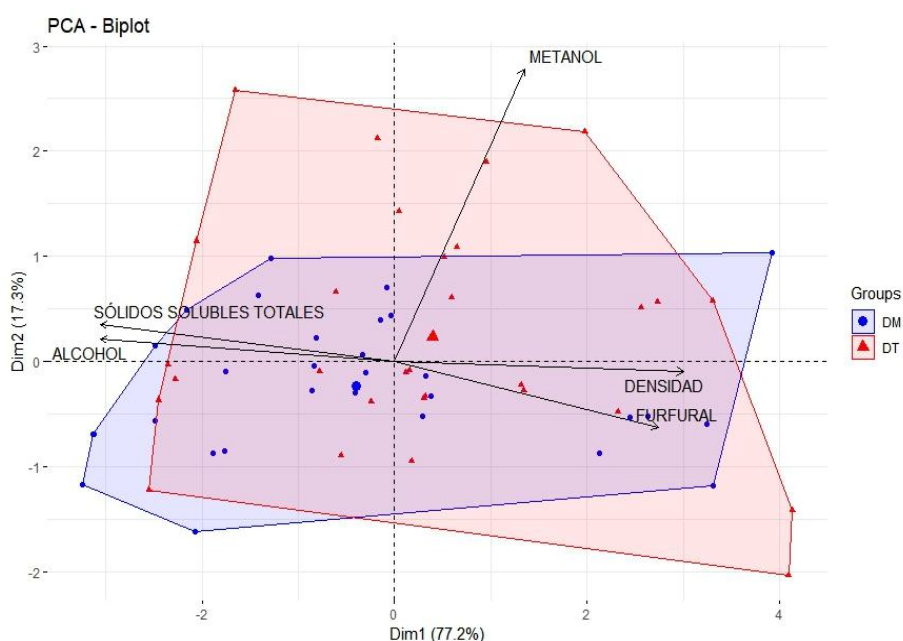


Figura 28. Gráfico de PCA de las variables fisicoquímicos del destilado de mezcal por proceso de DT y DM.

El análisis demuestra que controlar la temperatura durante la destilación ayuda a mantener más tiempo la fracción cordón, lo que disminuye el arrastre de compuestos no deseados de la fracción shishe, como el furfural y el metanol. Esto permite obtener un destilado más limpio y con mayor contenido de etanol, por lo que el uso de un sistema de control representa una ventaja operativa en comparación con la destilación tradicional.

3.4 Conclusión

La implementación de un sistema de control térmico en el proceso de destilación artesanal ha demostrado ser una estrategia efectiva para optimizar la producción sin comprometer la esencia del método tradicional. Los resultados indican que no hubo diferencias significativas en los compuestos fisicoquímicos del producto final entre los métodos tradicional y modificado. Ambos procesos produjeron mezcal que cumple con los límites de metanol y furfural establecidos por la NOM-070-SCFI-2016.

Además de la calidad del producto, la principal ventaja del proceso modificado radica en su eficiencia operativa y sostenibilidad. El sistema instrumentado logró una reducción del consumo de agua de 355 L por postura, lo que se traduce en un ahorro diario de 1,421 L y de 4.85 kg de leña por postura, equivalente a 19.4 kg por día. Además, esta instrumentación reduce la carga de trabajo del maestro mezcalero, facilitando la estandarización del proceso sin perder su carácter artesanal. La integración de este sistema representa una alternativa viable para optimizar el uso de agua y energía en los palenques. Este enfoque no solo asegura la calidad e inocuidad del mezcal y la competitividad en el mercado, sino que también promueve una producción más sostenible y eficiente, con beneficios directos para las comunidades productoras.

3.5 Agradecimientos

Agradezco profundamente al maestro mezcalero C. Jaime Favián Díaz, de la comunidad de Sitio de Xitlapehua, Miahuatlán, Oaxaca, por su apoyo y por abrir las puertas de su palenque de producción artesanal de mezcal. Reconocimiento al financiamiento de la Dirección General de Investigación, Posgrado y Servicio de la Universidad Autónoma Chapingo mediante el proyecto 25166-C-62, así como a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por la Beca Nacional de Maestría otorgada.

Extiendo mi agradecimiento al Posgrado en Ciencia y Tecnología Agroalimentaria por las facilidades y el acompañamiento brindados durante el desarrollo de este trabajo de investigación.

3.6 Literatura citada

- Balcerek, M., Pielech P., K., Patelski, P., Dziekońska K., U., y Strąk, E. (2017). The effect of distillation conditions and alcohol content in 'heart' fractions on the concentration of aroma volatiles and undesirable compounds in plum brandies: Distillation conditions affect plum distillates quality. *Journal of the Institute of Brewing*, 123(3), 452–463. <https://doi.org/10.1002/jib.441>
- Blumenthal, P., Steger, M. C., Einfalt, D., Rieke-Zapp, J., Quintanilla Bellucci, A., Sommerfeld, K., Schwarz, S., y Lachenmeier, D. W. (2021). Methanol mitigation during manufacturing of fruit spirits with special consideration of novel coffee cherry spirits. *Molecules*, 26(9), 25-85. <https://doi.org/10.3390/molecules26092585>
- Çengel, Y. A., y Boles, M. A. (2015). *Introduction and basic concepts: thermodynamics: an engineering approach*. pdfcoffee.com. <https://pdfcoffee.com/introduction-and-basic-concepts-thermodynamics-an-engineering-approach-pdf-free.html>
- Cancino, H. N., Martínez, D. J., Terán, F. R., y Urbina, J. A. S. (2022). Behavior of the volatile compounds regulated by the Mexican Official Standard NOM-070-SCFI-2016 during the distillation of artisanal Mezcal. *Biotechnia*, 24(2), 20-27. <https://doi.org/10.18633/biotechnia.v24i2.1577>
- Danahy, B. B., Minnick, D. L., y Shiflett, M. B. (2018). Computing the composition of ethanol-water mixtures based on experimental density and temperature measurements. *Fermentation*, 4(3), 72. <https://doi.org/10.3390/fermentation4030072>
- De León-Meza, R. (2015). Coconut wine and mezcal: A history of joint commerce during the colonial era. *Letras Históricas*, 12, 15–36. <https://doi.org/10.31836/lh.12.1746>
- Flores-Martínez, H., Tejeda A., I. G., Estarrón E., M., y Padilla R., J. D. (2025). Solving a challenge in the tequila industry: a new continuous rectification process for reducing higher alcohols and obtaining products within the official tequila standard. *ChemEngineering*, 9(3), 59. <https://doi.org/10.3390/chemengineering9030059>
- García-Soto, M. J., Jiménez-Islas, H., Navarrete-Bolaños, J. L., Rico-Martínez, R., Miranda-López, R., y Botello-Álvarez, J. E. (2011). Kinetic Study of the Thermal Hydrolysis of *Agave salmiana* for Mezcal Production. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(13), 7333–7340. <https://doi.org/10.1021/jf200026y>
- Hatta-Sakoda, B., Guevara-Pérez, A., y Morales-Soriano, E. (2024). Evolution of acetaldehyde, methanol, and furfural in pisco distillation. *ACS Food Science & Technology*, 4(4), 889–894. <https://doi.org/10.1021/acsfoodscitech.3c00627>

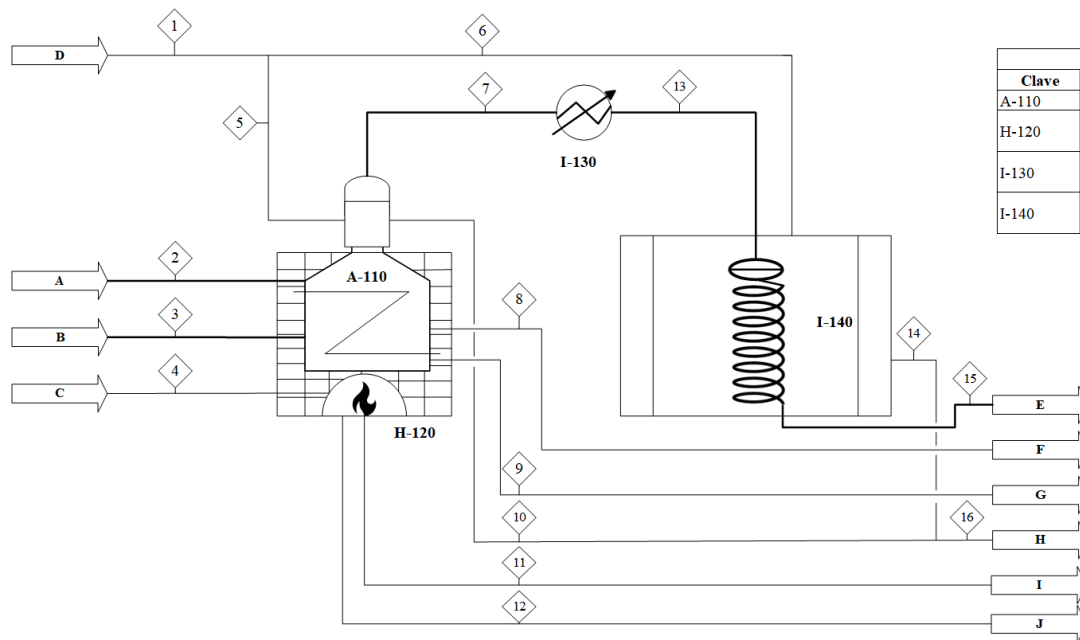
- Lachenmeier, D. W., Godelmann, R., Steiner, M., Ansay, B., Weigel, J., y Krieg, G. (2010). Rapid and mobile determination of alcoholic strength in wine, beer and spirits using a flow-through infrared sensor. *Chemistry Central Journal*, 4, 5. <https://doi.org/10.1186/1752-153X-4-5>
- Lorenzo-Santiago, M. A., Rodríguez-Campos, J., Rendón-Villalobos, R., García-Hernández, E., Vallejo-Cardona, A. A., y Contreras-Ramos, S. M. (2023). Thermal treatment to obtain 5-hydroxymethyl furfural (5-HMF), furfural and phenolic compounds from vinasse waste from agave. *Molecules*, 28(3), 1063. <https://doi.org/10.3390/molecules28031063>
- Sánchez F., R. E., Pérez L., A., Morales S., A., Manilla T., Y., Reyes C., E. D., y Avila U., G. (2025). Chemistry of Mezcal: Volatile Profile of Artisanal Mezcal Made from Wild Agaves of Oaxaca. *Foods*, 14(7), 1222. <https://doi.org/10.3390/foods14071222>
- Schestak, I., Spriet, J., Black, K., Styles, D., Faragó, M., Rygaard, M., y Williams, A. P. (2023). Heat recovery and water reuse in micro-distilleries improves eco-efficiency of alcohol production. *Revista de Gestión Ambiental*. <https://10.1016/j.jenvman.2022.116468>
- Secretaría de Economía. (2017). *Norma Oficial Mexicana NOM-070-SCFI-2016. Bebidas alcohólicas-Mezcal-Especificaciones*.
- Tian, T.T., Ruan, S. L., Zhao, Y. P., Li, J. M., Yang, C., y Cao, H. (2022). Multi-objective evaluation of freshly distilled brandy: Characterisation and distribution patterns of key odour-active compounds. *Food Chemistry: X*, 14, 100276. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2022.100276>
- Vera-Guzmán, A. M., Guzmán-Gerónimo, R. I., López, M. G., y Chávez-Servia, J. L. (2018). Volatile Compound Profiles in Mezcal Spirits as Influenced by Agave Species and Production Processes. *Beverages*, 4(1), 9. <https://doi.org/10.3390/beverages4010009>
- Xiang, X. F., Lan, Y. B., Gao, X. T., Xie, H., An, Z. Y., Lv, Z. H., Yin Shi, Duan, C.-Q., y Wu, G. F. (2020). Characterization of odor-active compounds in the head, heart, and tail fractions of freshly distilled spirit from Spine grape (*Vitis davidii* Foex) wine by gas chromatography-olfactometry and gas chromatography-mass spectrometry. *Food Research International*, 137, 109388. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109388>

4. CONCLUSIÓN GENERAL

El desarrollo del sistema de control automático de temperatura en la montera del destilador artesanal de mezcal demostró que es posible mejorar la eficiencia del proceso sin perder la esencia del método tradicional. Con esta instrumentación se logró mantener una temperatura más estable, reducir el consumo de agua y leña, y facilitar el trabajo del maestro mezcalero. Además, el sistema permitió obtener un producto de buena calidad que cumple con los límites establecidos por la NOM-070-SCFI-2016, norma que regula las especificaciones del mezcal. En conclusión, esta investigación muestra que la automatización puede ser una herramienta útil para fortalecer la producción artesanal de mezcal, hacerla más sostenible y contribuir al desarrollo de las comunidades productoras de esta bebida

5. APÉNDICES

Apéndice 1. Diagrama de flujo de destilación tradicional sin recirculación de agua.



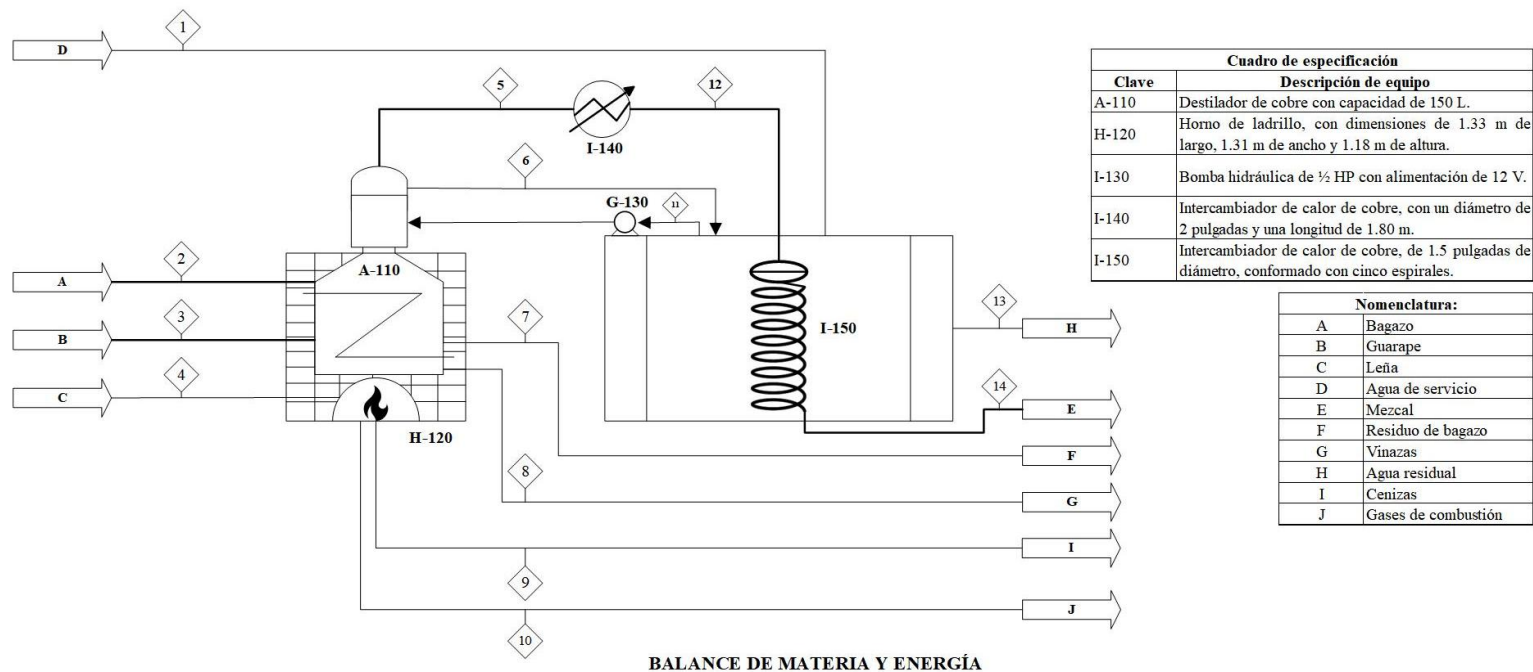
Cuadro de especificación	
Clave	Descripción de equipo
A-110	Destilador de cobre con capacidad de 150 L.
H-120	Horno de ladrillo, con dimensiones de 1.33 m de largo, 1.31 m de ancho y 1.18 m de altura.
I-130	Intercambiador de calor de cobre, con un diámetro de 2 pulgadas y una longitud de 1.80 m.
I-140	Intercambiador de calor de cobre, de 1.5 pulgadas de diámetro, conformado con cinco espirales.

Nomenclatura:	
A	Bagazo
B	Guarape
C	Leña
D	Agua de servicio
E	Mezcal
F	Residuo de bagazo
G	Vinazas
H	Agua residual
I	Cenizas
J	Gases de combustión

BALANCE DE MATERIA Y ENERGÍA

	Agua de servicio	Bagazo	Guarape	Leña	Agua de servicio	Agua de servicio	Vapor	Residuo de bagazo	Vinazas	Agua residual	Cenizas	Gases de combustión y carbón	Vapor	Agua residual	Mezcal	Agua residual
Propiedad	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Masa (kg)	4220160	92.57	25.20	26.94	120160	4100000	12.12	68.64	36.99	120160	0.81	26.13	12.12	4100000	12.12	4220160
Fracción agua (kg · kg ⁻¹)*	1	0.97	0.97	0.3	1	1	0.5	1.0	0.97	1	—	—	0.54	1	0.538	1
Fracción sólidos solubles totales (kg · kg ⁻¹)*	—	0.03	0.03	0.8	—	—	0.2	0.03	0.03	—	—	—	0.16	—	0.157	—
Contenido de alcohol (% v/v)	—	13.3	13.3	—	—	—	46.2	11	11	—	—	—	46.2	—	46.2	—
Densidad (kg · m ⁻³)	1000	1019.89	1004.1	800	1000	1000	935.5	350	1050	1000	350	0.49	935.5	1000	935.5	1000
Temperatura (°C)	20	20	20	20	20	20	88.2	90	90	82.9	20	400	88.2	25.8	22.51	27.42
Presión (kPa)	83.8	83.8	83.8	83.8	83.8	83.8	65.8	83.8	83.8	83.8	83.8	83.8	65.75	83.8	83.8	83.8
Calor específico (kJ · kg ⁻¹ · °C ⁻¹)	4.18	1.91	2.42	1.40	4.18	4.18	2.86	—	—	4.18	—	1.05	2.86	4.18	2.86	4.18
Entalpía específica líquido (kJ · kg ⁻¹)	83.6	—	—	—	83.6	83.6	—	—	—	346.5	—	—	—	107.8	64.4	114.62
Entalpía específica vapor (kJ · Kg ⁻¹)	—	—	48.4	—	—	—	252.60	—	—	—	—	—	252.6	—	—	—

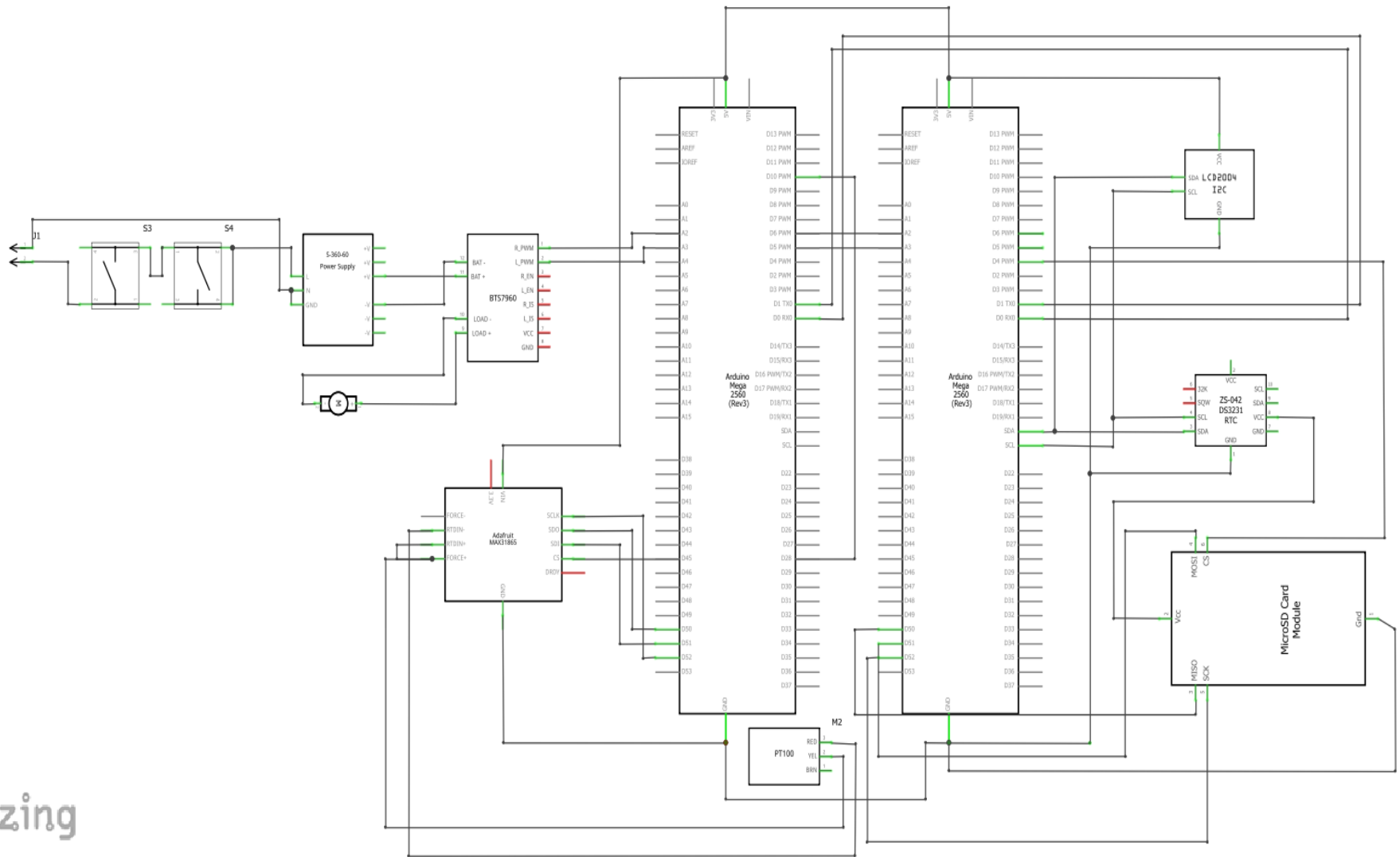
Apéndice 2. Diagrama de flujo de proceso de destilación con recirculación de agua.



BALANCE DE MATERIA Y ENERGÍA

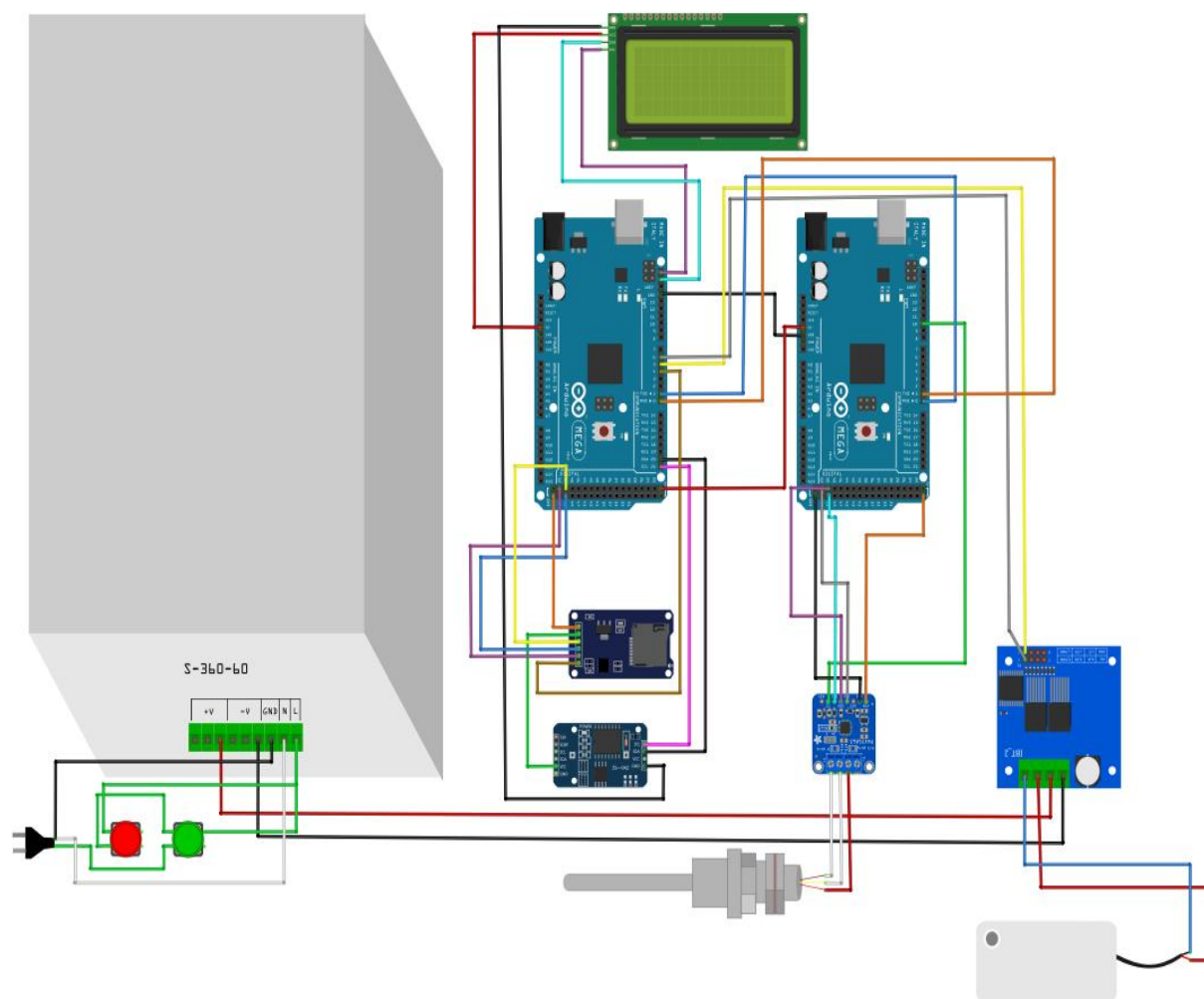
	Agua de servicio	Bagazo	Guarape	Leña	Vapor	Agua de servicio	Residuo de bagazo	Vinazas	Cenizas	Gases de combustión	Agua de servicio	Vapor	Agua residual	Mezcal
Propiedad	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Masa (kg)	4100	95.9	25.1	22.09	15.92	47.74	71.09	32.42	0.66	21.43	47.74	15.92	4100	15.92
Fracción agua (kg · kg ⁻¹)*	1	0.97	0.97	0.25	0.53	1	0.98	0.98	—	—	1	0.53	1	0.53
Fracción sólidos solubles totales (kg · kg ⁻¹)*	0	0.03	0.03	0.75	933.9	—	0.02	0.02	—	—	—	933.9	—	933.9
Contenido de alcohol (% v/v)	0	9.3	9.3	—	47.1	—	9.1	9.1	—	—	—	47.1	—	47.1
Densidad (kg · m ⁻³)	1000	1019.9	1004.1	800	925.3	1000	657.06	657.06	350	0.49	1000	925.3	1000	925.3
Temperatura (°C)	20	20	20	20	88.2	25.5	90	90	20	400	25.5	88.2	20	22.71
Presión (kPa)	83.8	83.8	83.8	83.8	77.5	83.8	83.8	83.8	83.8	83.8	83.8	77.5	83.8	83.8
Calor específico (kJ · kg ⁻¹ · °C ⁻¹)	4.18	1.91	2.42	1.4	2.86	4.18	—	—	—	1.05	4.18	2.86	4.18	2.86
Entalpía específica líquido (kJ · kg ⁻¹)	83.6	—	—	—	—	106.59	—	—	—	—	106.59	—	83.6	64.95
Entalpía específica vapor (kJ · Kg ⁻¹)	—	—	48.4	—	252.252	—	—	—	—	—	—	252.252	—	—

Apéndice 3. Diagrama eléctrico del circuito.



fritzing

Apéndice 4. Diagrama de conexiones del prototipo.



Apéndice 5. Código Arduino de la unidad maestra (control y actuadores).

```
#include <Wire.h>
#include <Sodaq_DS3231.h>
#include <SD.h>
#include <SPI.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <Fuzzy.h>

// ===== Config HW =====
const uint8_t LCD_ADDR = 0x27; // <- si no ves nada, cambia a 0x3F
LiquidCrystal_I2C lcd(LCD_ADDR, 20, 4);

const int chipSelect = 4; // microSD CS
const int RPWM = 6; // IBT-2 RPWM
const int LPWM = 5; // IBT-2 LPWM (dirección), fijo LOW

File logFile;
bool sd_ok = false;

char          weekDay[][4]
{"Dom","Lun","Mar","Mie","Jue","Vie","Sab"};

// ===== Control difuso =====
Fuzzy *fuzzy = new Fuzzy();
FuzzyInput *errorIn;
FuzzyOutput *bomba;
FuzzySet *frio, *estable, *caliente;
FuzzySet *bajo, *medio, *alto;

// ===== Estado =====
float setpoint = 85.0;
float temperaturaRecibida = NAN;
unsigned long tPrevLog = 0;
const unsigned long LOG_EVERY_MS = 5000;

// pequeño "heartbeat" para LCD
uint8_t hbPos = 19;

// ===== Fecha =====
int calculateDayOfWeek(int y, int m, int d){
    if (m < 3){ m += 12; y--; }
    int K = y % 100, J = y / 100;
    int h = (d + (13 * (m + 1)) / 5 + K + (K/4) + (J/4) + (5*J))
    % 7;
    return ((h + 6) % 7); // 0=Dom..6=Sab
}

DateTime compileTime(){
    int year, month, day, hour, minute, second; char monthStr[4];
    sscanf(__DATE__, "%3s %d %d", monthStr, &day, &year);
    const char*
    months[]={"Jan","Feb","Mar","Apr","May","Jun","Jul","Aug","Sep",
    "Oct","Nov","Dec"};
    for (month=0; month<12; month++){ if (strcmp(monthStr,
    months[month], 3)==0) break; }
    month++;
    sscanf(__TIME__, "%d:%d:%d", &hour, &minute, &second);
    return DateTime(year, month, day, hour, minute, second,
    calculateDayOfWeek(year, month, day));
}

// ===== IO utils =====
bool leerTemperaturaSerial1(float &outT){
    static String buf=""; bool ok=false;
    while (Serial1.available()){
        char c=(char)Serial1.read();
        if (c=='\n' || c=='\r'){
            buf.trim();
            if (buf.length()>0 && buf!="ERROR"){
                String s=buf;
                s.replace("Temp:", ""); s.replace("temp:", "");
                s.replace("TEMP:", "");
                s.replace("C", ""); s.replace("c", ""); s.trim();
                if (s.length()>0){
```

```

float t=s.toFloat();
if (!isnan(t)){ outT=t; ok=true; }
}
}
buf="";
}else{
buf+=c; if (buf.length()>100) buf.remove(0);
}
}
return ok;
}

// spVal: evitar macro SP de AVR
void lcdMostrar(DateTime now, float T, float spVal, int pwm){
  char linea[21];
  snprintf(linea,sizeof(linea),"%04d/%02d/%02d      %02d:%02d",
now.year(),now.month(),now.date(),now.hour(),now.minute());
  lcd.setCursor(0,0); lcd.print(" ");
  lcd.setCursor(0,0); lcd.print(linea);

  lcd.setCursor(0,1);          lcd.print("Dia:          ");
  lcd.print(weekday[now.dayOfWeek()]);
  lcd.print(" ");

  lcd.setCursor(0,2); lcd.print("Temp: ");
  if (isnan(T)) lcd.print("--.--");
  else lcd.print(T,2);
  lcd.print((char)223); lcd.print("C ");

  lcd.setCursor(0,3);
  lcd.print("SP: "); lcd.print(spVal,1); lcd.print((char)223);
  lcd.print("C PWM:");
  lcd.print(pwm); lcd.print(" ");

  // heartbeat (punto que avanza al final de la línea 0)
  lcd.setCursor(hbPos,0); lcd.print(".");
  hbPos = (uint8_t)((hbPos==19)? 16 : hbPos+1); // recorre del
col 16 a 19
}

```

```

void logCSV(DateTime now, float T, int pwm){
  if (!sd_ok) return;
  logFile = SD.open("datalog.csv", FILE_WRITE);
  if (!logFile) return;
  char fecha[11], hora[9];
  sprintf(fecha,"%04d/%02d/%02d",
now.year(),now.month(),now.date());
  sprintf(hora,                                "%02d:%02d:%02d",
now.hour(),now.minute(),now.second());
  logFile.print(millis()); logFile.print(",");
  logFile.print(fecha); logFile.print(",");
  logFile.print(hora); logFile.print(",");
  if (isnan(T)) logFile.print(""); else logFile.print(T,4);
  logFile.print(","); logFile.println(pwm);
  logFile.close();
}

// ===== Setup =====
void setup(){
  pinMode(RPWM,OUTPUT);
  pinMode(LPWM,OUTPUT);
  digitalWrite(LPWM,LOW);
  analogWrite(RPWM,0);

  Serial.begin(9600);
  Serial1.begin(9600);

  lcd.init(); lcd.backlight(); lcd.clear();
  lcd.setCursor(0,0); lcd.print("Iniciando...");
  delay(800); lcd.clear();

  rtc.begin();
  // Ajustar una sola vez si hace falta:
  // rtc.setDateTime(compileTime());

  sd_ok = SD.begin(chipSelect);
  if (sd_ok && !SD.exists("datalog.csv")){
    File f=SD.open("datalog.csv", FILE_WRITE);

```

```

    if
f.println("Tiempo(ms),Fecha,Hora,Temperatura(°C),PWM");
f.close(); }
}

// --- Fuzzy ---
errorIn = new FuzzyInput(1);
frio = new FuzzySet(-10, -5, -5, 0);
estable = new FuzzySet(-2, 0, 0, 2);
caliente = new FuzzySet( 0, 5, 10, 15);
errorIn->addFuzzySet(frio);    errorIn->addFuzzySet(estable);
errorIn->addFuzzySet(caliente);
fuzzy->addFuzzyInput(errorIn);

bomba = new FuzzyOutput(1);
bajo = new FuzzySet(0, 70, 70, 100);
medio = new FuzzySet(80, 150, 150, 200);
alto = new FuzzySet(180, 255, 255, 255);
bomba->addFuzzySet(bajo);  bomba->addFuzzySet(medio);  bomba->addFuzzySet(alto);
fuzzy->addFuzzyOutput(bomba);

FuzzyRuleAntecedent *ifCold=new FuzzyRuleAntecedent();
ifCold->joinSingle(frio);
FuzzyRuleAntecedent *ifStable=new FuzzyRuleAntecedent();
ifStable->joinSingle(estable);
FuzzyRuleAntecedent *ifHot=new FuzzyRuleAntecedent(); ifHot->joinSingle(caliente);

FuzzyRuleConsequent *thenLow=new FuzzyRuleConsequent();
thenLow->addOutput(bajo);
FuzzyRuleConsequent *thenMed=new FuzzyRuleConsequent();
thenMed->addOutput(medio);
FuzzyRuleConsequent *thenHigh=new FuzzyRuleConsequent();
thenHigh->addOutput(alto);

fuzzy->addFuzzyRule(new FuzzyRule(1, ifCold, thenLow));
fuzzy->addFuzzyRule(new FuzzyRule(2, ifStable, thenMed));
fuzzy->addFuzzyRule(new FuzzyRule(3, ifHot, thenHigh));
}

```

```

(f){

```

```

// ===== Loop =====

```

```

void loop(){
    DateTime now = rtc.now();

    // 1) Actualizar temperatura desde Serial1 si llega algo
    float tTmp;
    if (leerTemperaturaSerial1(tTmp)) {
        temperaturaRecibida = tTmp;
    }

    // 2) Salida
    int pwmOut = 0;

    if (!isnan(temperaturaRecibida)) {
        float errorValue = temperaturaRecibida - setpoint;

        // Guardas anti-"zona muerta" (porque tus sets cubren solo -
        // 8..+8)
        if (errorValue <= -8.0f) {
            pwmOut = 0; // muy por debajo del SP -> bomba casi apagada
            (lógico para enfriar)
        } else if (errorValue >= 8.0f) {
            pwmOut = 240; // muy por arriba del SP -> bomba fuerte
        } else {
            // Dentro del rango del difuso
            fuzzy->setInput(1, errorValue);
            fuzzy->fuzzify();
            float pwmF = fuzzy->defuzzify(1);
            pwmOut = (int)(pwmF + 0.5f);
        }

        pwmOut = constrain(pwmOut, 0, 255);
        digitalWrite(LPWM, LOW);
        analogWrite(RPWM, pwmOut);

        // Monitor
        Serial.print("Temp: "); Serial.print(temperaturaRecibida,2);
        Serial.print(" °C | Error: "); Serial.print(errorValue,2);
        Serial.print(" | PWM: "); Serial.println(pwmOut);
    }
}

```



```

} else {
  analogWrite(RPWM, 0);
}

// 3) LCD
lcdMostrar(now, temperaturaRecibida, setpoint, pwmOut);

// 4) Log cada 5 s
unsigned long t = millis();
if (t - tPrevLog >= LOG_EVERY_MS){
  tPrevLog = t;
  logCSV(now, temperaturaRecibida, pwmOut);
}

delay(150);
}

```

Apéndice 6. Código Arduino del módulo sensor (PT100-MAX31865)

```

#include "Adafruit_MAX31865.h"

#define CS_PIN 10 // Pin CS del MAX31865
Adafruit_MAX31865 thermo = Adafruit_MAX31865(CS_PIN);

#define RREF 430.0
#define RNOMINAL 100.0

void setup() {
  Serial.begin(9600); // Comunicación serial con el monitor
  serial

```

```

  Serial1.begin(9600); // Comunicación serial con el Mega 2 (por
  Serial1)

  thermo.begin(MAX31865_3WIRE); // Configuración de 3 hilos
  Serial.println("Iniciando MAX31865...");
}

void loop() {
  uint8_t fault = thermo.readFault();
  if (fault) {
    Serial.print("Falla detectada: 0x");
    Serial.println(fault, HEX);
    thermo.clearFault(); // Borrar la falla
  } else {
    float temp = thermo.temperature(RNOMINAL, RREF); // Obtener la
    temperatura
    Serial.print("Temperatura: ");
    Serial.print(temp, 2);
    Serial.println(" °C");

    // Solo enviar si la temperatura es válida (no 0.00)
    if (temp != 0.00) {
      Serial1.println(temp); // Enviar la temperatura al Mega 2
    } else {

```

```
Serial1.println("ERROR"); // Enviar un mensaje de error en  
caso de falla  
}  
  
}  
delay (1000);
```