

Evaluación del rendimiento de un sistema de evaporación al vacío aplicado al tratamiento del efluente derivado de la producción de aceite de palma (POME)

Israel David Mantilla Bravo y José Luis Suarez Flechas

Trabajo de Grado para Optar al Título de ingeniero mecánico

Director

Diego Luis Franco Jácome

Ingeniero Mecánico PhD

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2024

Dedicatoria

Esta tesis está dedicada a mi gente, familia y amigos, que siempre han creído en mí, incluso más que yo mismo en el pasado. Sin ellos, sencillamente no podría ser quien soy ni haber hecho lo que he hecho hasta ahora. También está dedicada especialmente a mi madre, porque sé que esto culmina una etapa de mi vida que le traerá una alegría inmensa, por la cual nunca ha dejado de apoyarme. Esta tesis representa el alcance de mi título profesional de ingeniero mecánico, y es un logro que quiero compartir con todos ellos.

Israel David Mantilla Bravo

A mis padres, Jairo y Luisa, por su amor incondicional, por ser el pilar más importante de mi vida, con su ejemplo de fortaleza y dedicación. Este logro es tanto de ustedes como mío. A mis hermanos, por ser un apoyo constante y por compartir conmigo cada desafío y logro. A mi novia, por su compañía, comprensión y por creer en mí en cada momento del camino. Y a su familia, quienes me brindaron su apoyo y me hicieron sentir en casa durante mi etapa en la ciudad. Gracias a esta tesis, estoy un paso más cerca de convertirme en ingeniero mecánico, un logro que no habría alcanzado sin el apoyo incondicional de ustedes.

José Luis Suárez Flechas

Agradecimientos

En primer lugar, agradecemos a Dios por permitirnos llegar hasta este punto y haber superado todos los obstáculos que se presentaron en el camino. Muchas gracias especialmente al profesor Diego Franco por apoyarnos, orientarnos y ayudarnos a sacar este proyecto adelante en todo cuanto fue posible. A Andrés, Oscar, Daniel y toda la gente de PHINA BIOSOLUCIONES S.A.S por su apoyo económico, técnico, material y conocimiento durante el desarrollo del proyecto.

A Edgar Acosta por su apoyo con el sistema de generación de vapor. A nuestros docentes por tomarse el tiempo de atender las consultas que fueron necesarias. A las personas del taller de la escuela por todo el apoyo que nos brindaron en la adecuación del banco de pruebas. Finalmente, a la escuela y a la universidad por brindarnos el conocimiento, talento humano, instalaciones y herramientas necesarios para afrontar este proyecto.

Israel David Mantilla Bravo

José Luis Suarez Flechas

También doy gracias a mi familia y a mis amigos por apoyarme y motivarme a sacar esto adelante. Pues más de una vez me demostraron por qué vale la pena alcanzar estos objetivos. Mil gracias a todos.

Israel David Mantilla Bravo

Doy gracias principalmente a mis padres por todo su esfuerzo y sacrificio. Ellos se pusieron nuestras botas, y su vida fue de nuestros logros y nuestras derrotas. Y este logro en específico es totalmente gracias a ellos.

José Luis Suarez Flechas

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	18
1. Objetivos	21
1.1 Objetivo General	21
1.2 Objetivos Específicos.....	21
2. Marco teórico	22
2.1. Proceso de extracción de aceite de palma	22
2.2. POME	23
2.3. Métodos de tratamiento de POME.....	23
2.3.1. Lagunas abiertas.....	23
2.3.2. Reactor Anaeróbico de Flujo Ascendente y Manto de Lodos-UASB	24
2.3.3. Coagulación-floculación	24
2.4. Marco legal	24
2.4.1. Resolución 0631 de 2015.....	24
2.4.2. Decreto 1076 de 2015	25
2.4.3. Resolución 1207 de 2014.....	25
2.5. Evaporación al vacío.....	26
2.5.1. Evaporación con bomba de calor	27
2.5.2. Evaporación por termocompresión	27
2.5.3. Evaporación multiefecto	28
2.6. Transferencia de calor por convección	28
2.6.1. Ebullición.....	28

2.6.2. Condensación	29
2.6.3 Convección interna forzada	30
3. Metodología	32
3.1 Adecuación del banco de laboratorio.....	32
3.1.1. Sistema de acondicionamiento de muestras.....	32
3.1.2. Adición de un sistema eliminador de aerosoles (“rompegotas”).....	35
3.1.3. Adición de instrumentación	36
3.1.4. Modificaciones en la torre de enfriamiento	38
3.1.5. Sistema de adquisición de datos	41
3.2. Diseño de experimentos	42
3.2.1. Reconocimiento y establecimiento del problema objeto de estudio.....	42
3.2.2. Selección de variables dependientes y unidades.....	42
3.2.3. Selección de factores, niveles y tratamientos	43
3.2.4. Elección del diseño experimental	43
3.2.5. Ejecución de los experimentos.....	44
3.2.6. Análisis estadístico de los datos.....	48
3.3. Evaluación de desempeño del sistema.....	55
3.4. Desarrollo de un modelo matemático de transferencia de calor	57
3.4.1. Consideraciones previas.....	58
3.4.2. Análisis térmico del evaporador de calandria.....	60
3.4.2.1. Ebullición en la superficie interior de los tubos del evaporador.....	61
3.4.2.2. Condensación en la superficie exterior de los tubos del evaporador.	62
3.4.3. Análisis térmico del condensador	65

3.4.3.1. Condensación en la superficie externa de los tubos.....	66
3.4.3.2. Transferencia de calor hacia el agua de la torre de enfriamiento.	67
3.4.4. Análisis de resultados de los modelos del sistema de evaporación	68
3.5. Análisis de laboratorio de las muestras de POME.....	69
4. Análisis y resultados	69
4.1. Resultados de los experimentos	69
4.1.1. Cambios de fase de los fluidos involucrados.....	70
4.1.2. Análisis de resultados del tratamiento del POME mediante la evaporación al vacío.....	71
4.2. Análisis de varianza (ANOVA).....	78
4.2.1. Verificación de supuestos	78
4.2.1.1. Normalidad de los datos por grupo.....	78
4.2.1.2. Homogeneidad de varianzas.	79
4.2.2. Resultados del ANOVA.....	79
4.2.3. Comprobación de las hipótesis de ANOVA	82
4.3. Construcción de un modelo predictivo	84
4.4. Evaluación de desempeño del sistema.....	89
4.5. Resultados del modelo térmico teórico.....	90
4.6. Análisis fisicoquímicos de las muestras de POME.....	93
5. Conclusiones	95
6. Recomendaciones	98
Referencias bibliográficas.....	100
Anexos	103
Anexo A. Resultados experimentales de las otras combinaciones experimentales	103

Anexo B. Desarrollo del modelo predictivo de regresión lineal.....	110
Anexo C. Código del análisis estadístico en el entorno de R	118
Anexo D. Cálculo del consumo energético del sistema.....	125
Anexo E. Ecuaciones de los modelos térmicos en el entorno de PYTHON.....	130
Anexo F. Resultados de laboratorio del análisis fisicoquímico de las muestras de POME.....	137

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Parámetros y límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales aplicables al sector palmero, Resolución 0631 de 2015.....	25
Tabla 2. Combinaciones experimentales, 4 bloques con 3 repeticiones cada uno	44
Tabla 3. Hipótesis de la relevancia de los factores	50
Tabla 4. Componentes de la correlación de Rohsenow para ebullición nucleada	62
Tabla 5. Componentes del coeficiente de transferencia de calor promedio para la condensación en película laminar sobre una placa vertical.....	63
Tabla 6. Propiedades de la condensación en película presentada en el condensador	66
Tabla 7. Operaciones relevantes durante las pruebas con temperatura de suministro de POME de 70°C y alto suministro de energía.....	76
Tabla 8. Muestras de condensado provenientes de las pruebas experimentales.....	78
Tabla 9. Resultados de la prueba estadística Shapiro-Wilk	78
Tabla 10. Resultados de la prueba de Levene	79
Tabla 11. Resultados del ANOVA.....	79
Tabla 12. Modelo de regresión lineal modificado, descartando dos medidas que pueden ser influyentes.....	84
Tabla 13. Resultados del consumo de energía del sistema	89
Tabla 14. Rendimiento del sistema de evaporación al vacío	89
Tabla 15. Resultados destacados del modelo térmico del evaporador del sistema.....	91
Tabla 16. Resultados destacados del modelo térmico del condensador del sistema	92
Tabla 17. Resultados de análisis fisicoquímicos.....	93

Tabla 18. Resultados del modelo de regresión lineal sin descartar ningún dato experimental ..	113
Tabla 19. Resultados del modelo de regresión lineal descartando una medida que puede ser influyente	115
Tabla 20. Resultados de las pérdidas de energía por paredes del calderín	128

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Proceso productivo en planta de extracción de aceite de palma	22
Figura 2. Curva de ebullición para agua	29
Figura 3. Tipos de condensación	30
Figura 4. Número de Nusselt para flujo laminar en la región de entrada o completamente desarrollado en un tubo circular.....	31
Figura 5. Estado inicial del banco de laboratorio de evaporación al vacío multietapa.....	32
Figura 6. Alimentador para ingreso de POME al sistema de evaporación	33
Figura 7. Compartimiento de control del sistema de alimentación	34
Figura 8. Sistema de alimentación del banco experimental.....	34
Figura 9. Rompegotas con malla de acero inoxidable	35
Figura 10. Termorresistencias PT100	36
Figura 11. Transductor de presión SWK-P300-DROPTCE	37
Figura 12. Ubicación de los sensores de presión y temperatura	37
Figura 13. Bomba de la torre de enfriamiento antes y después del cambio.....	39
Figura 14. Mangueras nuevas de la torre de enfriamiento.....	39
Figura 15. Secciones transversales que atraviesa el agua antes de intervenir en las mangueras de la torre de enfriamiento.....	40
Figura 16. Secciones transversales que atraviesa el agua después de intervenir en las mangueras de la torre de enfriamiento.	40
Figura 17. Equipamiento del datalogger FieldLogger novus.....	41

Figura 18. Medida de gramos de condensados provenientes del banco experimental por medio de una báscula.....	43
Figura 19. Diagrama esquemático del banco de pruebas de evaporación al vacío.....	45
Figura 20. Componentes del análisis de residuos	51
Figura 21. Diagrama de presión contra entalpía del agua.....	58
Figura 22. Volumen de control del proceso de expansión isoentálpica del POME.....	59
Figura 23. Volumen de control del evaporador de Calandria del sistema de evaporación al vacío	60
Figura 24. Volumen de control del condensador del sistema de evaporación al vacío	65
Figura 25. Estados del POME durante las pruebas experimentales.....	70
Figura 26. Comparativa entre el POME que ingresa al sistema y los condensados recolectados del condensador	71
Figura 27. Comportamiento de la presión durante las pruebas con temperatura de suministro de POME de 70°C y alto consumo de energía	72
Figura 28. Comportamiento de la temperatura durante las pruebas con temperatura de suministro de POME de 70°C y alto consumo de energía.....	72
Figura 29. Comportamiento de la temperatura del evaporador durante las pruebas con temperatura de suministro de POME de 70°C y alto consumo de energía.....	73
Figura 30. Comportamiento de la temperatura por encima del evaporador durante las pruebas con temperatura de suministro de POME de 70°C y alto consumo de energía.....	73
Figura 31. Comportamiento de la temperatura de los lodos durante las pruebas con temperatura de suministro de POME de 70°C y alto consumo de energía.....	74

Figura 32. Comportamiento de la extracción de condensados del condensador durante las pruebas con temperatura de entrada de POME de 70°C y alto suministro de energía.....	76
Figura 33. Sistema estacionario	77
Figura 34. Diagrama de interacción de los resultados obtenidos.....	80
Figura 35. Diagrama de cajas y bigotes de los resultados obtenidos.....	81
Figura 36. Gráficos de residuos del modelo predictivo	82
Figura 37. Distancia de Cook de los datos experimentales del modelo predictivo	84
Figura 38. Diagrama de predicción del modelo vs datos experimentales.....	87
Figura 39. Intervalo de confianza del modelo predictivo de regresión lineal.....	88
Figura 40. Intervalo de predicción del modelo predictivo de regresión lineal	88
Figura 41. Volumen de control y visualización de resultados del evaporador del sistema	91
Figura 42. Volumen de control y visualización de resultados del condensador del sistema	92
Figura 43. Comportamiento de la presión durante la primera parte de las pruebas con temperatura de suministro de POME de 90°C y alto consumo de energía.....	103
Figura 44. Comportamiento de la temperatura durante la primera parte de las pruebas con temperatura de suministro de POME de 90°C y alto consumo de energía.....	104
Figura 45. Comportamiento de la extracción de condensados del condensador durante la primera parte de las pruebas con temperatura de entrada de POME de 90°C y alto suministro de energía	104
Figura 46. Comportamiento de la presión durante la segunda parte de las pruebas con temperatura de suministro de POME de 90°C y alto consumo de energía.....	105
Figura 47. Comportamiento de la temperatura durante la segunda parte de las pruebas con temperatura de suministro de POME de 90°C y alto consumo de energía.....	105

Figura 48. Comportamiento de la extracción de condensados del condensador durante la segunda parte de las pruebas con temperatura de entrada de POME de 90°C y alto suministro de energía	106
Figura 49. Comportamiento de la presión durante las pruebas con temperatura de suministro de POME de 70°C y bajo suministro de energía	107
Figura 50. Comportamiento de la temperatura durante las pruebas con temperatura de suministro de POME de 70°C y bajo suministro de energía	108
Figura 51. Comportamiento de la extracción de condensados del condensador durante las pruebas con temperatura de entrada de POME de 70°C y bajo suministro de energía.....	108
Figura 52. Comportamiento de la presión durante las pruebas con temperatura de entrada de POME de 90°C y bajo suministro de energía	109
Figura 53. Comportamiento de la temperatura durante las pruebas con temperatura de suministro de POME de 90°C y bajo suministro de energía	109
Figura 54. Comportamiento de la extracción de condensados del condensador durante las pruebas con temperatura de entrada de POME de 90°C y bajo suministro de energía.....	110
Figura 55. Gráficos de residuos considerando todos los datos experimentales.....	111
Figura 56. Diagrama de la distancia de Cook para las 12 muestras de los resultados experimentales	112
Figura 57. Gráficos de residuos del modelo de regresión lineal modificado.....	116
Figura 58. Distancia de Cook de las observaciones en el modelo modificado.....	118
Figura 59. Zonas de medición de temperatura en el calderín	127

Glosario

Análisis de varianza (ANOVA): técnica estadística que se utiliza para comparar las medias de tres o más grupos de datos para determinar si existen diferencias significativas entre ellas. Analizando la viabilidad dentro de los grupos y entre los grupos, permitiendo evaluar si la variabilidad observada se debe al factor que se está estudiando o simplemente al azar.

Condensación en película: es un tipo de condensación que ocurre cuando el vapor se enfría y se convierte en líquido, formando una película continua sobre la superficie fría. Este tipo de condensación sucede generalmente en superficies inclinadas o verticales.

Convección interna forzada: proceso de transferencia de calor que ocurre dentro de un fluido en movimiento, inducido por fuerzas externas, como un ventilador, bomba o compresor a través de una superficie confinada. El aumento de la velocidad del fluido por medios mecánicos mejora la tasa de transferencia de calor.

Diseño de experimentos factorial: técnica estadística que se utiliza para estudiar el efecto de múltiples factores sobre una o más variables de respuesta de manera simultánea. Realizando experimentos con todas las combinaciones posibles de los niveles de los factores para evaluar los efectos principales de cada factor y las interacciones entre ellos.

Ebullición nucleada: es un tipo de ebullición que ocurre cuando un líquido se calienta hasta su punto de ebullición y las burbujas de vapor comienzan a formarse en sitios específicos llamados sitios de nucleación, en la superficie del material que está en contacto con el líquido. Estas burbujas crecen y se desprenden de la superficie, llevando calor desde la superficie sólida hacia el líquido, aumentando la transferencia de calor.

Efluente de aceite de Palma (POME): efluente líquido generado durante el proceso de extracción de aceite de palma. Este residuo es una mezcla compleja de agua, sólidos en suspensión, aceites residuales, fibras, etc.

Energía térmica residual: es el calor que se genera en un proceso industrial o sistema mecánico, pero que no es aprovechada directamente, en la mayoría de los casos esta energía es disipada al ambiente como calor residual o desperdiciado.

Evaporación al vacío: proceso de separación térmica donde un líquido se convierte en vapor a temperaturas inferiores a las habituales, al reducir la presión por debajo de la presión atmosférica.

Resumen

Título: Evaluación del rendimiento de un sistema de evaporación al vacío aplicado al tratamiento del efluente derivado de la producción de aceite de palma (POME)*

Autor: Israel David Mantilla Bravo, José Luis Suarez Flechas**

Palabras Clave: Efluente, Tratamiento, Disposición, Evaporación al vacío, Desempeño, Diseño factorial, Transferencia de calor

Descripción:

El proceso de extracción de aceite de palma implica la obtención del residuo del efluente de plantas extractoras de aceite de palma (POME), el cual provoca consecuencias ambientales considerables en caso de ser vertido sobre cuerpos hídricos sin ningún tratamiento previo. En Colombia, el POME es tratado mediante sistemas de lagunas abiertas. Sin embargo, las normativas ambientales se tornan más exigentes en los criterios de disposición de estos residuos y surge la necesidad de identificar métodos que permitan cumplir con estos parámetros y ser aplicados en el proceso de extracción.

Este proyecto de investigación analiza el desempeño del sistema de evaporación al vacío de múltiple efecto, ubicado en la Universidad Industrial de Santander, para el tratamiento del POME. El banco de pruebas fue adecuado mediante la inclusión de un sistema de acondicionamiento de muestras, sensores de temperatura y presión, un eliminador de aerosoles y cambios de bomba y conexiones en la torre de enfriamiento. Se realizaron pruebas experimentales de acuerdo con un diseño de experimentos factorial de 2 factores por 2 niveles para evaluar el efecto que tienen la temperatura de entrada del efluente y la tasa de energía que se le suministra dentro del proceso. Además, se desarrolló un modelo térmico-teórico que reflejó ineficiencias en la transferencia de calor, evidenciando la necesidad de una mayor área de transferencia de calor en los sistemas de evaporación y condensación.

El banco de pruebas procesa 0.106 ± 0.006 litros de POME por cada kWh de energía consumida. El factor más influyente sobre la tasa de POME tratado es la tasa de energía suministrada al sistema. Por último, los resultados de las pruebas fisicoquímicas de los subproductos del proceso de evaporación al vacío destacan el potencial de esta forma de tratamiento para la reducción del volumen y las cargas contaminantes del efluente.

* Trabajo de Grado

** Facultad de ingenierías fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería mecánica. Ingeniería mecánica. Director: Diego Luis Franco Jácome. Ingeniero Mecánico PhD.

Abstract

Title: Performance Evaluation of a Vacuum Evaporation System Applied to the Treatment of Effluent Derived from Palm Oil Production (POME)*

Author(s): Israel David Mantilla Bravo, José Luis Suarez Flechas**

Key Words: Effluent, Treatment, Disposal, Vacuum Evaporation, Performance, Factorial Design, Heat Transfer

Description:

The palm oil extraction process involves obtaining effluent residue from palm oil extraction plants (POME), which causes considerable environmental consequences if it is dumped into water bodies without any prior treatment. In Colombia, POME is treated through open lagoon systems. However, environmental regulations are becoming more demanding in terms of the criteria for the disposal of this waste. The need arises to identify methods that allow these parameters to be met and applied in the extraction process.

This research project analyzes the performance of the multiple-effect vacuum evaporation system, located at the Industrial University of Santander, for the treatment of POME. The test bench was suitable by including a sample conditioning system, temperature and pressure sensors, an aerosol eliminator, and pump and connections changes in the cooling tower. Experimental tests were carried out according to a factorial design of 2 factors by 2 levels to evaluate the effect of the inlet temperature of the effluent and the rate of energy supplied to it within the process. In addition, a thermal-theoretical model was developed that reflected inefficiencies in heat transfer, evidencing the need for a larger heat transfer area in evaporation and condensation systems.

The test bench processes 0.106 ± 0.006 liters of POME for every kWh of energy consumed. The most influential factor in the rate of POME treated is the rate of energy supplied to the system. Finally, the results of the physicochemical tests of the by-products of the vacuum evaporation process highlight the potential of this treatment method for the reduction of the volume and pollutant loads of the effluent.

* Degree Work

** Faculty of Physical and Mechanical Engineering. School of Mechanical Engineering. Mechanical engineering. Director: Diego Luis Franco Jácome. Mechanical Engineer PhD.

Introducción

En Colombia, la palma de aceite se consolida como el cultivo de mayor extensión, con alrededor de 580 mil hectáreas sembradas. Además, cuenta con un total de 70 plantas de beneficio activas y tiene presencia en más de 20 departamentos del país, lo que genera un impacto con la creación de 191 mil empleos relacionados con esta industria y la formación de 136 alianzas productivas estratégicas. En los últimos años, este sector productivo ha presentado una tendencia creciente en el mercado. En el año 2022, la producción de aceite crudo de palma alcanzó un valor histórico de 9,7 billones de pesos (un aumento del 25% respecto a 2021) y generó un total de USD 999 millones en exportaciones. Con esto, la participación de la industria de la palma en el PIB agrícola nacional fue de 17,6% (fedepalma, 2023).

El proceso de extracción de aceite de palma genera un residuo líquido conocido como Efluente de Palma de Aceite (Palm Oil Mill Effluent - POME). Por cada tonelada de Racimo de Fruto Fresco (RFF) procesada se generan 0.75 toneladas del efluente. Del mismo modo, por cada tonelada producida de aceite de palma crudo, se requiere una cantidad significativa de agua (entre 5 y 7.5 toneladas), de la cual la mitad se convierte en POME (Vairappan & Yen, 2008). Este efluente requiere de tratamiento antes de ser vertido a las fuentes hídricas para mitigar sus impactos ambientales. Ello se debe a que su composición presenta una alta demanda química y bioquímica del oxígeno (DQO y DBO₅ respectivamente), al igual que altas concentraciones de cloruros. El POME utiliza el oxígeno disuelto en las fuentes hídricas para oxidarse, lo que puede provocar cambios abruptos en el ecosistema. Los efectos ambientales de este vertido incluyen la alteración de la calidad del agua y posibles aumentos en el pH, lo que puede provocar la desaparición de peces y plantas (Salguero, 2017).

En Colombia, el 100% del POME es tratado mediante sistemas de laguna abierta, donde aproximadamente el 20% del mismo es utilizado (después del tratamiento) en la producción de compost, mientras que el resto no tiene ninguna aplicación posterior. Además, menos del 20% de los sistemas de tratamiento en el país capturan y aprovechan biogás, y menos del 12% de las plantas de beneficio de aceite de palma cuentan con biodigestores para la captura de biogás dentro de sus sistemas de tratamiento (Chaparro, 2023). Adicionalmente, los sistemas de laguna abierta requieren de grandes volúmenes y superficies de retención, lo que conlleva a la acumulación de lodos. Asimismo, es difícil mantener las condiciones ideales para la digestión de las bacterias (como su temperatura y alimentación adecuadas), lo cual lo convierte en un sistema de tratamiento ineficiente. Al mismo tiempo, el proceso de digestión emite gases de efecto invernadero (GEI) a la atmósfera, como el gas metano (CH_4), y produce fuertes olores (Althausen, 2016).

En resumen, la Industria de la Palma colombiana tiene un amplio margen para tecnificar y modernizar sus sistemas de depuración y disposición del POME, lo cual permitiría reducir sus efectos ambientales. Este proceso de modernización es inminente una vez que las normativas ambientales vigentes (Resolución 0631 de 2015) han establecido unos criterios más exigentes en la disposición de residuos y emisiones de la industria de la palma.

Una posible alternativa para la disposición del POME es mediante tratamientos térmicos, como la evaporación al vacío. En particular, la disminución de presión provoca que la temperatura de ebullición se reduzca, haciendo posible la evaporación del efluente a bajas temperaturas o inclusive la evaporación *flash* (Condorchem Envitech, 2023). El POME puede someterse a evaporación *flash* una vez que su temperatura a la salida del proceso es lo suficientemente alta (80°C a 90°C) como para producir una evaporación instantánea en una válvula hacia un sistema de vacío (Ismail et al., 2014). La operación de este tipo de tecnología puede reducir las emisiones

provocadas por la descomposición del POME en las lagunas abiertas. Además, no requiere grandes extensiones de área y permite obtener agua destilada que generalmente se puede reutilizar en otros procesos. Asimismo, la carga contaminante del efluente se concentra, generando un subproducto de lodos que podrían utilizarse como insumos para la producción de compost o ración animal (C&G IBERICA, 2018).

La principal desventaja de este método de tratamiento es su consumo energético. Sin embargo, las plantas extractoras de aceite de palma cuentan con energía térmica residual que el proceso de evaporación al vacío es capaz de aprovechar, reduciendo así su consumo de energía mismo (Ngan, 2000).

De acuerdo con lo anterior, este proyecto tiene como objetivo llevar a cabo un análisis teórico y experimental del desempeño de un sistema de evaporación al vacío aplicado al tratamiento del efluente de plantas extractoras de aceite de palma. Esta propuesta se realizó dentro de un convenio universidad/empresa, que contó con la colaboración de la empresa PHINA BIOSOLUCIONES S.A.S para su desarrollo. Esta entidad se especializa en la gestión de proyectos de innovación en el sector del aceite de palma, que identifica problemas y crea soluciones innovadoras y sostenibles para el sector palmicultor.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Contribuir con la misión de la escuela de ingeniería mecánica de formar profesionales que analicen las necesidades de su entorno y propongan soluciones óptimas mediante el uso eficiente de los recursos a su disposición a través de un análisis teórico y experimental del desempeño de un sistema de evaporación al vacío aplicado al tratamiento del efluente de plantas extractoras de aceite de palma.

1.2 Objetivos Específicos

- Adecuar el banco de pruebas de evaporación al vacío de múltiple efecto (ubicado en el Laboratorio de Sistemas Térmicos) para garantizar el control y registro de las variables del proceso de las pruebas experimentales: temperatura del efluente y presión de vacío.
- Efectuar pruebas experimentales del tratamiento de efluente de aceite de palma (POME) en el banco de pruebas de evaporación al vacío de múltiple efecto con la finalidad de caracterizar el desempeño del sistema.
- Elaborar un diseño de experimentos factorial de 2 factores por 2 niveles (2^2) para evaluar, mediante un análisis de varianza (ANOVA), el efecto de las variables: temperatura de suministro del efluente y tasa de energía suministrada.
- Realizar un modelo térmico teórico que relacione los parámetros operacionales y de diseño del sistema del banco de pruebas de evaporación al vacío sobre su rendimiento energético.

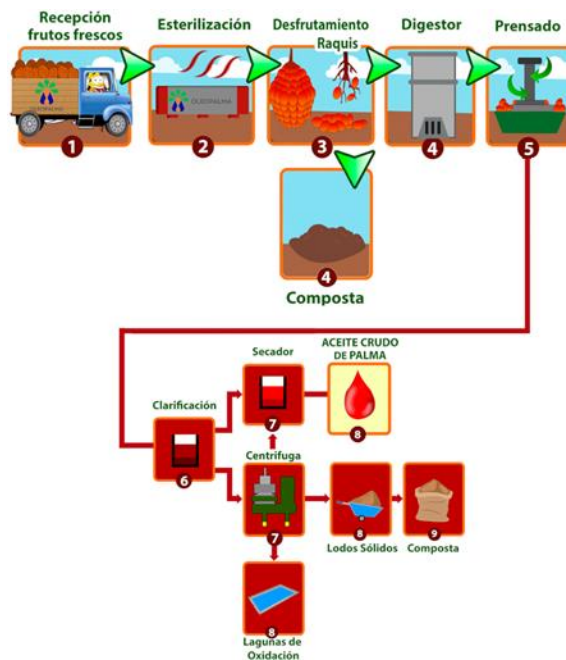
2. Marco teórico

2.1. Proceso de extracción de aceite de palma

El proceso de extracción de aceite de palma (ver Figura 1) consta de varias etapas en las cuales se realiza la maceración y el prensado para extraer el aceite mediante ambientes controlados de presión y temperatura (Peña & Lara, 2022). Estas etapas incluyen la recepción de la fruta, esterilización, desfrutado, prensado, clarificación, almacenamiento, desfibrado, y palmistería (Reinosa, 2009).

Figura 1

Proceso productivo en planta de extracción de aceite de palma



Nota. Tomado de *Proceso productivo en planta*, por Oleopalma. (s. f).
<https://www.oleopalma.com.mx/proceso-productivo-en-planta/>

Este proyecto se enfocó en el tratamiento de un residuo proveniente de la etapa de clarificación, en la cual se obtiene un efluente líquido no tóxico compuesto principalmente por

agua (95 - 96%), aceite (0.6 – 0.7%) y residuos sólidos suspendidos (2 - 4%), conocido como POME, Palm Oil Milling Effluent (Althausen, 2016).

2.2. POME

Consiste en un líquido espeso y de color marrón que al ser vertido en fuentes hídricas sin tratamiento provoca graves problemas en el ecosistema debido a su composición. Esta incluye en promedio 19020 mg/l de sólidos en suspensión (SS), 43635 mg/l de sólidos totales (SST), 8370 mg/l de aceites y grasas, 53630 mg/l de demanda química de oxígeno (DQO), y 25000 mg/l de demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) (Al-Amshawee et al., 2020).

2.3. Métodos de tratamiento de POME

Por lo mencionado anteriormente, el POME requiere de tratamiento antes de ser vertido en fuentes hídricas. Entre las técnicas más comunes para llevar a cabo el tratamiento del POME en el país, se identifican las siguientes:

2.3.1. *Lagunas abiertas*

Consiste en un método que utiliza bacterias sometidas a condiciones específicas para llevar a cabo la degradación del POME. Es una técnica de bajo costo que reduce considerablemente factores como el DQO y el DBO₅ del efluente. Sin embargo, los parámetros de operación de las bacterias no son fáciles de mantener ni controlar, emite gases de efecto invernadero (especialmente CH_4) y requiere grandes áreas de trabajo junto con un tiempo considerable para retener y degradar el POME (Khadaroo et al., 2019). Este método permite la instalación e implementación de sistemas de captura y aprovechamiento del CH_4 para producir biogás, lo cual reduce las emisiones a la atmósfera. No obstante, se convierte en un sistema costoso para la comercialización de biogás (Mohammad et al., 2021).

2.3.2. Reactor Anaeróbico de Flujo Ascendente y Manto de Lodos-UASB

Este método utiliza un reactor en posición vertical para evitar problemas de obstrucción y aprovecha esta estructura para el manejo de las bacterias en el proceso de degradación. Además, está equipado para tratar la producción de biogás a partir del tratamiento de POME y para soportar cargas orgánicas más elevadas. Sin embargo, requiere un alto consumo de energía y depende en gran medida de la sedimentabilidad del lodo (A Aziz et al., 2020).

2.3.3. Coagulación-floculación

Es un método de tratamiento fisicoquímico que consiste en añadir coagulantes y floculantes al POME para separar sus partículas más pequeñas. Aunque es un método de bajo costo, solo elimina sólidos suspendidos y aceite residual. Además, los coagulantes inorgánicos son sensibles a los cambios de pH (Lokman et al., 2021).

2.4. Marco legal

En Colombia, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) es el ente encargado de procurar el bienestar del medio ambiente. Para ello, ha expedido normas que controlan los niveles permisibles de contaminantes biológicos, físicos y químicos. Especialmente para el cuidado del recurso hídrico, se encuentran vigentes las normativas relacionadas con el vertimiento de residuos líquidos a cuerpos de agua.

2.4.1. Resolución 0631 de 2015

En esta norma se establecen los límites permisibles para el vertimiento de sustancias en cuerpos de agua y sistemas de alcantarillado público, entre otras consideraciones (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Resolución 0631, 2015). Dichos parámetros son indicados en la Tabla 1.

2.4.2. Decreto 1076 de 2015

Indica el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible.

2.4.3. Resolución 1207 de 2014

Se establecen las medidas relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas.

Tabla 1.

Parámetros y límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales aplicables al sector palmero, Resolución 0631 de 2015.

Parámetro	Límite máximo permisible
Generales	
Ph	6-9
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	1500 mg/l
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5)	600 mg/l
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	400 mg/l
Sólidos Sedimentables (SSED)	2 mg/l
Grasas y Aceites	20 mg/l
Compuestos Semivolátiles Fenólicos	Análisis y Reporte
Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM)	Análisis y Reporte
Hidrocarburos	
Hidrocarburos totales (HTP)	10 mg/l
Iones	
Cloruros (Cl-)	500 mg/l
Sulfatos (SO4 2-)	500 mg/l
Metales y metaloides	
Arsénico (As)	0,50 mg/l
Cadmio (Cd)	0,05 mg/l
Níquel (Ni)	0,50 mg/l
Plomo (Pb)	0,20 mg/l

Nota. Adaptado de *Resolución 0631 de 2015* (p. 8), por Ministerio de Ambiente y Desarrollo, 2015.

En marzo de 2015, se llevó a cabo una reunión entre el gobierno nacional y Fedepalma, en representación del sector palmero. Durante esta reunión, se establecieron los límites para los parámetros presentados en la Tabla 1. En el informe de dicha reunión, Fedepalma expresó su

preocupación por tres parámetros específicos. Debido a que su cumplimiento no podría lograrse con las tecnologías actuales en el país. Dos de estos parámetros son Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅), ambos clasificados como de dificultad media-baja para cumplir. Por último, el nivel de Cloruros (Cl⁻), catalogado con dificultad media-alta para alcanzar su cumplimiento. Actualmente, el sector palmero sigue en un proceso de transición, en el cual las empresas están en búsqueda de tecnologías que permitan cumplir los requerimientos del gobierno nacional (FEDEPALMA, 2015).

Los 3 parámetros indicados son los mayores indicadores de cargas contaminantes en las aguas residuales, de forma que al verterse en altas concentraciones afectan la calidad del agua y del suelo y amenazan a la flora y fauna del respectivo ecosistema. De este modo, resulta importante llevar a cabo medidas y controles que los mantenga en concentraciones aceptables.

2.5. Evaporación al vacío

La evaporación al vacío consiste en reducir la presión del interior del evaporador por debajo de la presión atmosférica, permitiendo reducir la temperatura de ebullición del líquido a evaporar al igual que el consumo y eficiencia energéticos del proceso. Una de las ventajas de esta técnica consiste en que permite destilar líquidos con un alto punto de ebullición (Castells, 2012). Se considera una técnica competitiva y eficaz una vez que los métodos convencionales dejan de ser viables o efectivos. Asimismo, transforma el efluente a tratar en una corriente de residuo concentrado que puede ser utilizado para fabricar abono y otra de agua destilada reutilizable en otros procesos (Condorchem Envitech, 2023).

Su principal inconveniente es el consumo energético del sistema. Sin embargo, este se puede apoyar de la energía residual del proceso de extracción de aceite de palma. La quema de fibra y cascarilla para generación de vapor en calderas o para generación de energía mediante la

quemada de biomasa son algunas formas en que el proceso de extracción puede suplir el consumo energético del proceso de evaporación al vacío con sus propios medios (Ngan, 2000).

Se identifican diversas modalidades de evaporación con diferentes ventajas económicas y técnicas en función de la caracterización del residuo. A continuación, se presentan algunas de las más representativas.

2.5.1. Evaporación con bomba de calor

Este método se basa en el ciclo frigorífico de un gas contenido en un circuito cerrado. El gas se comprime mediante la acción de un compresor, lo que aumenta su presión y temperatura. Luego circula a través de un intercambiador de calor específico del evaporador, calentando el líquido a evaporar mediante intercambio térmico. Posteriormente, durante la expansión del gas, se enfría el líquido evaporado y se extrae el destilado (Castells, 2012). Al utilizar este método, es posible alcanzar temperaturas de ebullición que van desde los 40 °C hasta los 80 °C. La energía absorbida en este procedimiento varía según la aplicación y el fluido a tratar. Sin embargo, son habituales consumos entre 150 y 200 W por litro de destilado (Castells, 2012).

2.5.2. Evaporación por termocompresión

Este método tiene como objetivo recuperar el calor latente de condensación del destilado para utilizarlo como fuente de calentamiento del líquido que se va a evaporar. Para lograrlo, se aumenta la temperatura del vapor generado durante la evaporación mediante compresión mecánica (Castells, 2012). Al pasar por el intercambiador del evaporador, este vapor comprimido (que se encuentra sobrecalentado), logra calentar el líquido que se va a evaporar y también permite su condensación. Lo que ahorra el uso de líquido refrigerante. Al utilizar este método, es posible alcanzar temperaturas de ebullición que van desde los 60 °C hasta los 90°C. Para este

procedimiento la energía absorbida varía entre los 60 y 80 W por litro de destilado (Castells, 2012).

2.5.3. Evaporación multiefecto

Implica una serie de evaporadores cuya presión disminuye progresivamente desde el primero hasta el último. Por esta razón, el vapor producido en el primer evaporador se utiliza como medio de calentamiento para el siguiente evaporador, al mismo tiempo que condensa el líquido evaporado en la etapa anterior. El último evaporador emplea una torre de enfriamiento para condensar el líquido evaporado (Castells, 2012). Debido al uso eficiente de la energía térmica, este sistema se caracteriza por el ahorro energético del fluido de calentamiento, ya que el propio líquido a evaporar contribuye a la condensación parcial del vapor producido. Para calentar el primer efecto, se utiliza vapor o agua sobrecalentada. Se estima que se necesitan aproximadamente 630 W para evaporar un litro de agua. Esta cantidad de energía se utiliza en la segunda y tercera etapa, en las cuales se pueden procesar 2 litros adicionales, para un total de 3 litros de destilado (Castells, 2012).

2.6. Transferencia de calor por convección

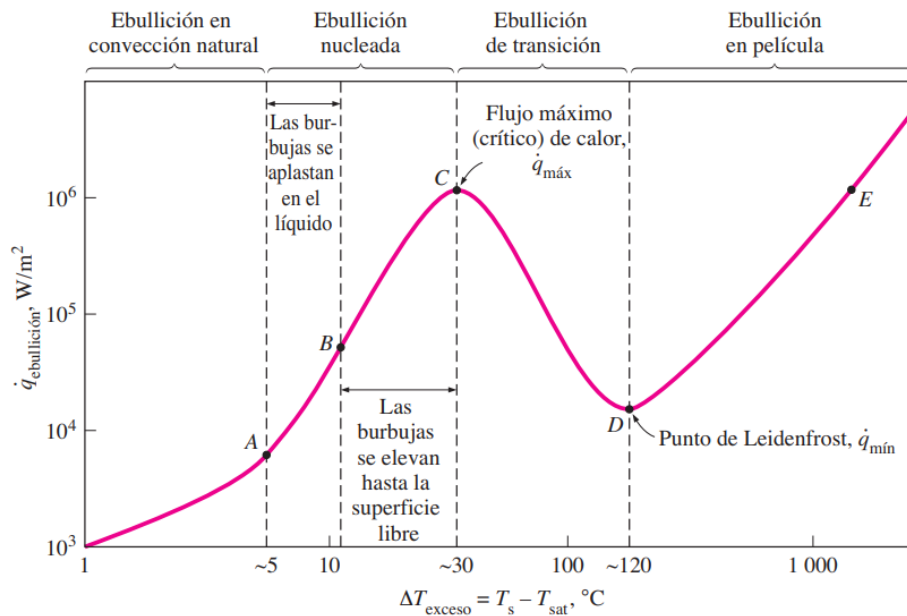
2.6.1. Ebullición

La ebullición consiste en un proceso de cambio de fase de líquido a vapor. En este caso, se da en la interfaz sólido-líquido en donde el efluente se encuentra en contacto con la superficie de los tubos del evaporador, la cual se encuentra a temperaturas superiores a la de saturación del efluente. Siendo así, la ebullición provoca la formación de burbujas de vapor que se separan de la superficie al alcanzar cierto tamaño y tienden a elevarse hacia la superficie libre del líquido (Cengel & Ghajar, 2011).

La ebullición presenta 4 regímenes que se indican en la curva de evaporación (ver Figura 2). Se observan: a) la ebullición en convección natural, donde la transferencia de calor se rige por este mecanismo; b) ebullición nucleada, cuando el vapor se forma en burbujas que crecen y se despegan de la superficie; c) ebullición de transición, un régimen inestable que presenta de forma parcial ebullición nucleada y en película; d) ebullición en película, cuando las burbujas se fusionan y forman una capa de vapor (Cengel & Ghajar, 2011).

Figura 2

Curva de ebullición para agua



Nota. Tomado de *Transferencia de calor y masa* (p. 585), por Cengel Y. & Ghajar A. 2011, McGrawHillEducation.

2.6.2. Condensación

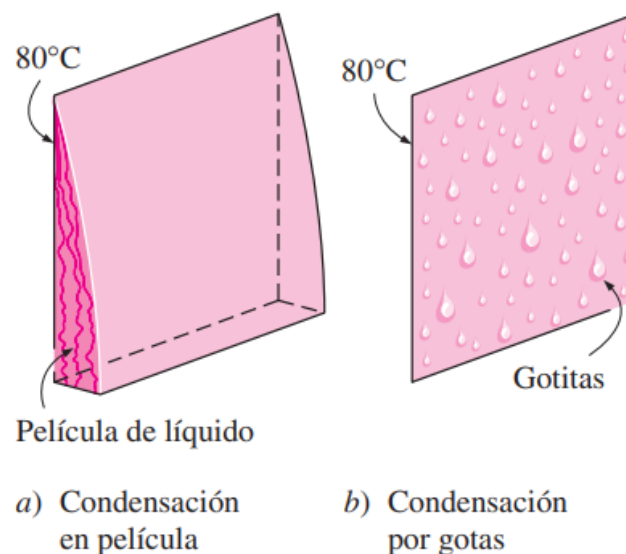
La condensación ocurre cuando la temperatura de un vapor (el efluente en este caso) disminuye por debajo de su temperatura de saturación. Suele suceder cuando el vapor entra en contacto con una superficie sólida que se encuentra a una temperatura menor que la temperatura

de saturación de ese vapor (Cengel & Ghajar, 2011). Se observan dos formas distintas de condensación: en película y por gotas (ver Figura 3).

En la condensación en película el condensado forma una película de líquido sobre la superficie, la cual resbala hacia abajo por efecto de la gravedad. En la práctica, esta es la forma más común en que ocurre la condensación. En la condensación por gotas el vapor condensado forma gotitas sobre la superficie, cubriéndola con un número incontable de gotitas de diámetros variables (Cengel & Ghajar, 2011).

Figura 3

Tipos de condensación



Nota. Tomado de *Transferencia de calor y masa* (p. 598), por Cengel Y. & Ghajar A. 2011, McGrawHillEducation.

2.6.3 Convección interna forzada

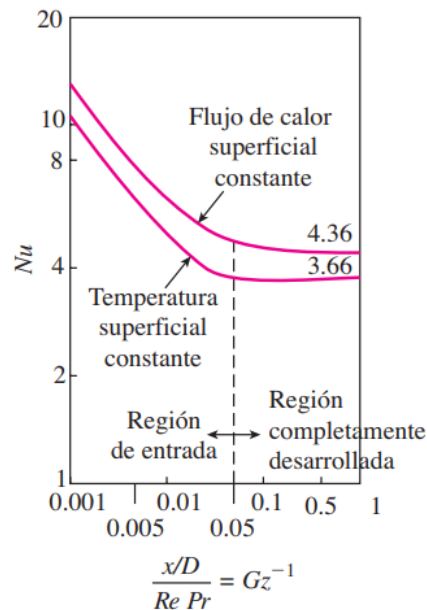
El flujo interno de un fluido es aquel que está confinado por completo en las superficies interiores de un tubo, lo cual limita el crecimiento de la capa límite. El flujo es forzado al ser impulsado por una bomba o un ventilador a través de un tramo de tubería suficientemente largo

para realizar la transferencia de calor esperada. Las condiciones térmicas de la superficie se pueden aproximar como temperatura superficial constante o flujo constante de calor en la superficie. El primero puede ocurrir cuando se presenta un cambio de fase en la superficie exterior del tubo del flujo. El segundo, cuando el tubo del flujo se somete a calentamiento uniforme desde todas las direcciones (Cengel & Ghajar, 2011).

El flujo suele ser laminar o turbulento. También puede ser de transición, pero no se cuenta con correlaciones teóricas precisas en ese caso. En el flujo laminar, es importante identificar si se trata de un flujo en la región de entrada o completamente desarrollado (ver Figura 4).

Figura 4

Número de Nusselt para flujo laminar en la región de entrada o completamente desarrollado en un tubo circular



Nota. Tomado de *Transferencia de calor y masa* (p. 484), por Cengel Y. & Ghajar A. 2011, McGrawHillEducation.

3. Metodología

3.1 Adecuación del banco de laboratorio

Los experimentos del tratamiento de POME mediante la evaporación al vacío se llevaron a cabo en el banco de pruebas de evaporación al vacío multiefecto del Laboratorio de Sistemas Térmicos de la Universidad Industrial de Santander (UIS). Sin embargo, para el alcance de los objetivos de este proyecto, el banco de pruebas fue utilizado en su configuración simple de una (1) única etapa. La Figura 5 presenta el banco experimental en su estado inicial previo a las modificaciones. A continuación, se describirán las modificaciones que se llevaron a cabo para mejorar los resultados de los experimentos.

Figura 5

Estado inicial del banco de laboratorio de evaporación al vacío multietapa



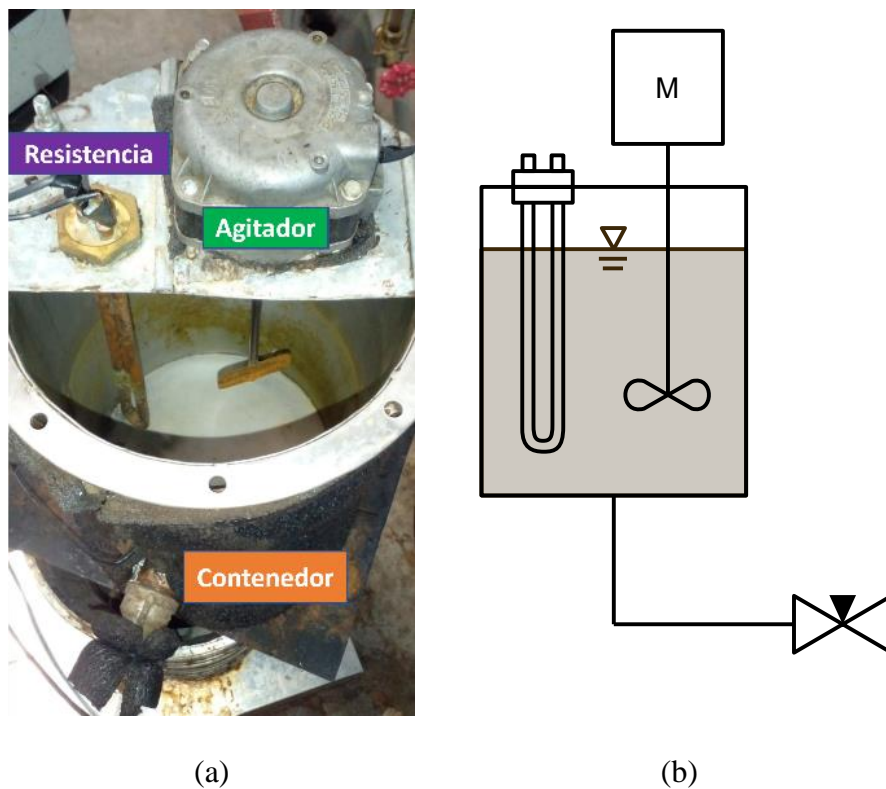
3.1.1. Sistema de acondicionamiento de muestras

En primer lugar, se adicionó un sistema de acondicionamiento de la muestra en la tolva de alimentación que permitiera suministrar el fluido (POME) a una temperatura determinada y en

condiciones homogéneas (ver Figura 6). Para ello se instaló un sistema de control de temperatura que incluye una resistencia de 800 W junto con un sistema de control para que el efluente alcance una temperatura de entrada. Debido a que el POME puede sedimentarse fácilmente, se adicionó un agitador que mantiene, no sólo una homogeneidad térmica del fluido, sino también un buen mezclado del mismo. Esto permite que el fluido ingrese al sistema en condiciones similares a las del proceso de extracción de aceite de palma. El agitador es impulsado por un motorreductor a bajas velocidades. Una válvula de globo fue utilizada para permitir el flujo de POME acondicionado al sistema de evaporación.

Figura 6

Alimentador para ingreso de POME al sistema de evaporación



Nota. (a) Montaje real del alimentador. (b) Montaje esquemático del alimentador.

Anexo al sistema de alimentación, se encuentra el sistema de control de temperatura que contiene una fuente de 5 V que alimenta un relé de estado sólido, el cual sirve de interfaz entre el control y la potencia (resistencia eléctrica de 10 A). El motor del agitador, la resistencia, y el controlador de esta, son alimentados por la red de corriente alterna de 110 volts. La resistencia es controlada por medio de un controlador Autonics TZN4S, el cual está conectado a un relé de estado sólido para evitar quemarse por el alto consumo de la resistencia. Ambos componentes también se encuentran dentro del compartimiento junto con un dimmer regulador de voltaje que permite manipular las RPM del motor del agitador. Este compartimiento se ilustra en la Figura 7, y el sistema de alimentación completo en la Figura 8.

Figura 7

Compartimiento de control del sistema de alimentación

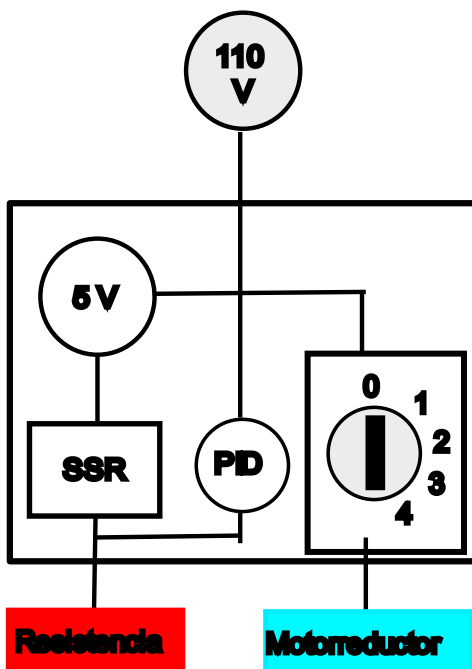


Figura 8

Sistema de alimentación del banco experimental



3.1.2. Adición de un sistema eliminador de aerosoles (“rompegotas”)

En el proceso de desmontaje y limpieza del sistema previo a su operación fue adicionado un sistema de retención de aerosoles o rompegotas. Para ello se utilizó una malla de acero inoxidable que sostiene una porción de relleno de torre de enfriamiento en la parte superior del evaporador (ver Figura 9). Su principal función es evitar el paso de POME en estado líquido hacia el área de condensación. Dependiendo de la temperatura de entrada del POME, este efecto puede ser relevante una vez que el ingreso del efluente a un sistema al vacío puede provocar una evaporación flash que arrastre la fase líquida hacia la zona de condensación.

Figura 9

Rompegotas con malla de acero inoxidable



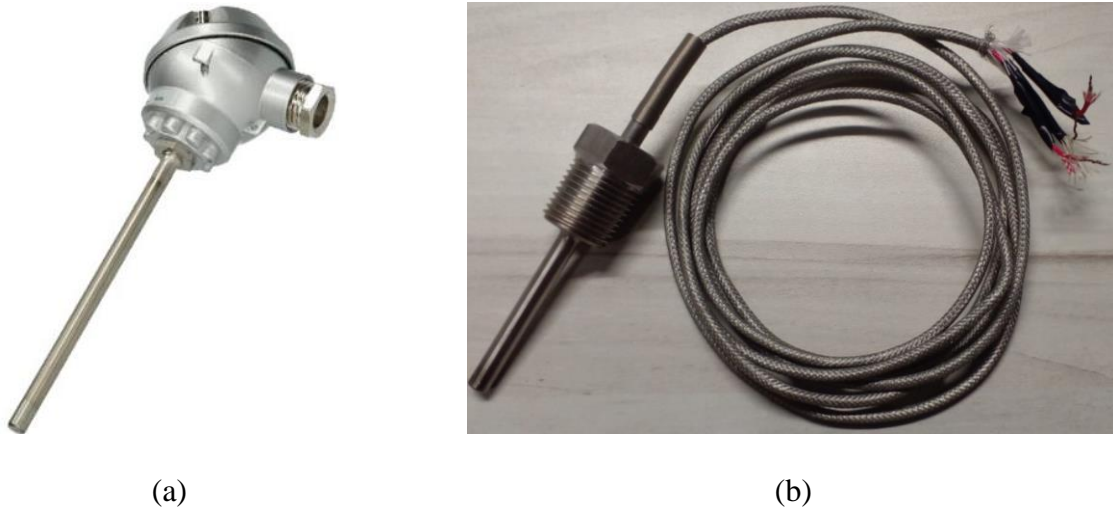
Nota. Malla de acero inoxidable 304 MESH 14 que sujeta relleno de torre de enfriamiento.

3.1.3. Adición de instrumentación

Fueron adicionados tres sensores de temperatura y un sensor de presión con el fin de monitorear las condiciones operacionales dentro del banco experimental. Los sensores de temperatura utilizados fueron termorresistencias PT100, de las cuales dos fueron facilitadas por la empresa PHINA BIOSOLUCIONES S.A.S, véase Figura 10. La temperatura durante el proceso fue monitoreada en el evaporador (luego de la evaporación flash), en los lodos que se concentran al fondo del evaporador, y en el vapor transportado hacia el condensador. Estos puntos se indican en la Figura 12.

Figura 10

Termorresistencias PT100



Nota. (a) Termorresistencias proporcionadas por PHINA BIOSOLUCIONES S.A.S. (b) Termorresistencias disponibles en el laboratorio de la UIS.

El monitoreo de presión dentro del sistema se llevó a cabo por medio de un transductor de presión de vacío SWK-P300-DROPTCE (ver Figura 11), el cual se ubica antes del condensador del sistema y que es alimentado por una fuente de 24 VCD. Adicionalmente, se instaló sobre una

cola de marrano (también llamada sifón), cuya función es disminuir la temperatura a la que estaría expuesto el transductor. Tanto el transductor como la fuente fueron proporcionados por PHINA BIOSOLUCIONES S.A.S.

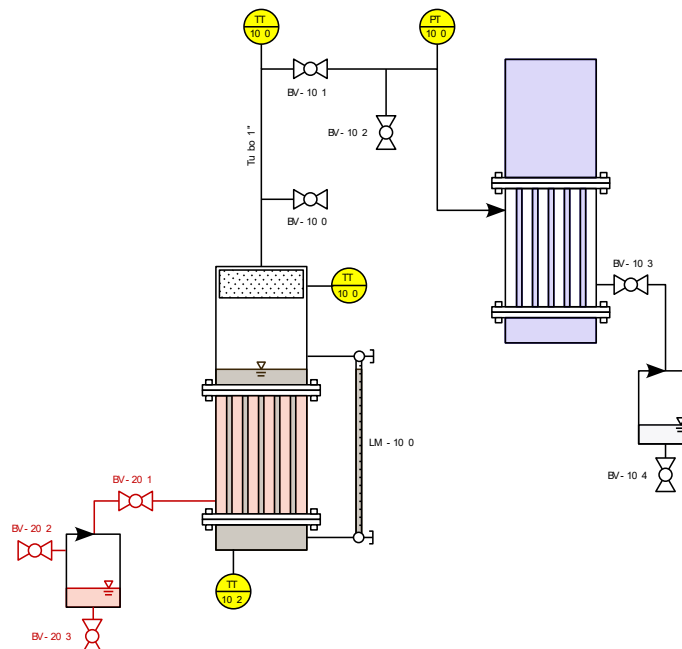
Figura 11

Transductor de presión SWK-P300-DROPTCE



Figura 12

Ubicación de los sensores de presión y temperatura



Nota. Los 4 sensores se encuentran resaltados.

3.1.4. Modificaciones en la torre de enfriamiento

El sistema de la torre de enfriamiento tiene una influencia determinante en el desarrollo de los experimentos, puesto que impacta en la capacidad de condensación del sistema del banco experimental.

Dado que a mayores flujos se puede garantizar una mayor tasa de condensación del sistema, se identificaron varias oportunidades de mejora en el sistema de la torre de enfriamiento. Entre estas se destacan la sustitución de la bomba de transporte de agua de enfriamiento y el cambio de mangueras por las que circula el fluido.

La primera intervención en la torre de enfriamiento se aplicó sobre la bomba, puesto que se observó que el flujo de la torre no era suficiente (7.27 litros/minuto). El sistema solía operar con una bomba MARQUEZ MKP 60-1 de 1/2 Hp. Esta bomba se encontraba en mal estado debido al alto tiempo en desuso y no contaba con suficiente capacidad para alcanzar un flujo aceptable para el desarrollo de los experimentos. Por lo tanto, se cambió por una bomba Siemens de 1/2 Hp que se encontraba disponible en las bodegas de la UIS (ver Figura 13).

De igual manera, se cambiaron las mangueras de conexión entre la torre de enfriamiento y el condensador del banco de pruebas. Estas mangueras se cambiaron por mangueras de mayor diámetro y menor longitud para reducir las pérdidas de carga por tuberías y optimizar el flujo másico.

Las 2 mangueras fueron cambiadas por 1.2 metros de diferentes mangueras. una con diámetro interno de 3/4 in entre la tubería saliente de la bomba y el condensador del banco de experimentos, y otra con diámetro interno de 1/2 in entre el condensador y la tubería entrante a los aspersores en la parte superior de la torre de enfriamiento. Estas mangueras se presentan en la Figura 14. Las conexiones de las mangueras se llevaron a cabo con niples de 3/4 in y 1/2 in para

evitar los cambios de sección. Las secciones transversales atravesadas por el agua de la torre de enfriamiento antes y después de las intervenciones se ilustran en la Figura 15 y Figura 16.

Figura 13

Bomba de la torre de enfriamiento antes y después del cambio



(a)



(b)

Nota. (a) Bomba de la torre de enfriamiento anterior. (b) Nueva bomba de la torre de enfriamiento.

Figura 14

Mangueras nuevas de la torre de enfriamiento



(a)



(b)

Nota. (a) 1.2 m de manguera de 1/2 in entre la salida del condensador y los aspersores de la torre de enfriamiento. (b) 1.2 m de manguera de 3/4 in entre la salida de bomba y la entrada del condensador.

Figura 15

Secciones transversales que atraviesa el agua antes de intervenir en la torre de enfriamiento.

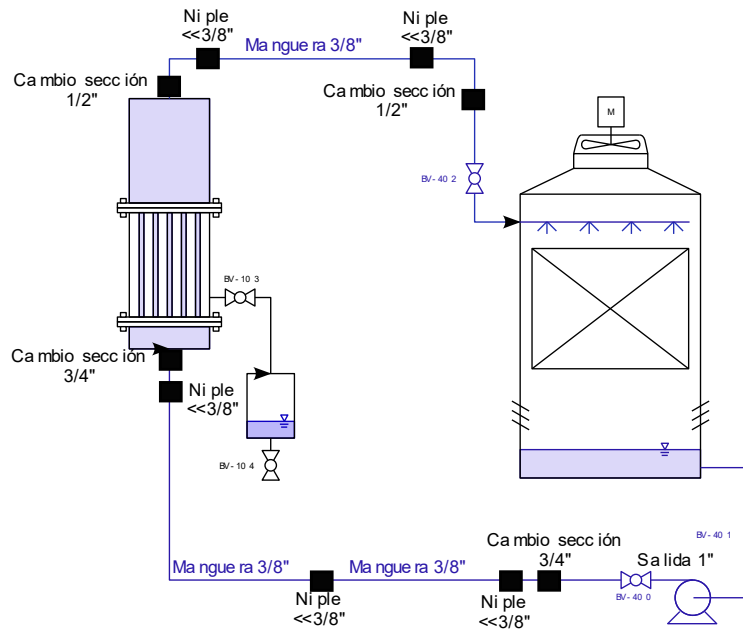
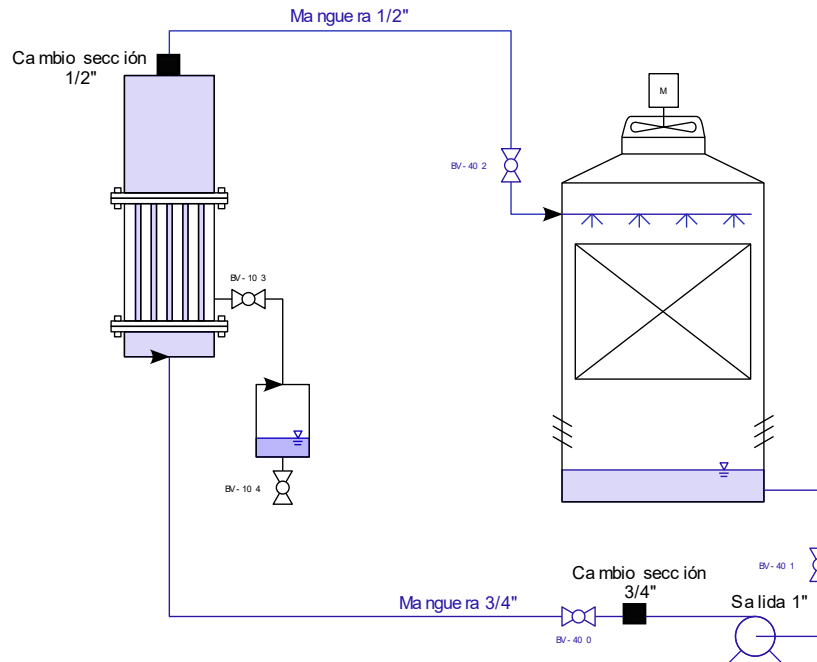


Figura 16

Secciones transversales que atraviesa el agua después de intervenir en la torre de enfriamiento.



Estas modificaciones permitieron que el flujo de agua en el sistema de enfriamiento alcanzara un valor de 63 L/min durante los experimentos, 9 veces la capacidad de flujo que se alcanzaba en un principio.

3.1.5. Sistema de adquisición de datos

La última modificación aplicada sobre el banco de laboratorio consistió en implementar un sistema de adquisición de datos datalogger de tipo “FieldLogger novus”, suministrado en calidad de préstamo por la empresa PHINA BIOSOLUCIONES S.A.S. Este dispositivo fue utilizado para almacenar y exportar los datos tomados por la instrumentación y permitir su visualización en tiempo real con ayuda del software FieldLoggerConfig. La Figura 17 presenta el sistema de adquisición de datos facilitado por la empresa PHINA BIOSOLUCIONES S.A.S.

Figura 17

Equipamiento del datalogger FieldLogger novus.



Nota. Suministrado por PHINA BIOSOLUCIONES S.A.S.

3.2. Diseño de experimentos

3.2.1. Reconocimiento y establecimiento del problema objeto de estudio

El banco de experimentos busca evaluar el rendimiento del proceso de tratamiento del efluente POME por medio de la evaporación al vacío. Como resultado de este tratamiento se obtienen dos subproductos: agua destilada reutilizable y lodos de POME concentrado. El efluente POME proveniente de la extracción de palma normalmente presenta temperaturas que pueden variar entre 80 y 90°C.

Este proceso de evaporación al vacío requiere una gran cantidad de energía térmica. Sin embargo, debido a la baja presión de operación durante el tratamiento, el efluente puede evaporarse a temperaturas bajas. Esto indica que es posible utilizar energía térmica residual (de baja calidad) en una planta de extracción de aceite de palma para su aprovechamiento. Durante los experimentos, esta energía fue suministrada en forma de vapor saturado a presión ambiente por un calderín (ver suministro de energía en la Figura 5).

Los experimentos propuestos buscan determinar la influencia de la temperatura de suministro del POME y la tasa de energía térmica suministrada al sistema de evaporación, sobre la cantidad de agua destilada resultante del proceso. Estos dos factores son variables del proceso relevantes y pueden manipularse de forma independiente en el banco de pruebas, por lo que es posible establecer qué tan significativos pueden ser en el desempeño de un sistema de evaporación al vacío en el tratamiento de POME.

3.2.2. Selección de variables dependientes y unidades

La variable de respuesta que fue medida es la cantidad de agua destilada (POME tratado). Se midió en gramos de agua destilada mediante el uso de una báscula (ver Figura 18).

Figura 18

Medida de gramos de condensados provenientes del banco experimental por medio de una báscula

**3.2.3. Selección de factores, niveles y tratamientos**

Los factores considerados son la temperatura de entrada del POME al banco experimental y la tasa de energía suministrada al sistema por el calderín. Este último determina si participa más o menos energía en el proceso de evaporación. Los niveles de la temperatura de entrada considerados fueron 70 y 90°C, y los niveles de suministro energético del calderín fueron 12.35 y 7.02 kWh (alto y bajo suministro energético respectivamente).

3.2.4. Elección del diseño experimental

Teniendo en cuenta lo anterior, se establecieron cuatro (4) combinaciones experimentales (tratamientos) con un total de doce (12) experimentos. Lo que corresponde a una matriz experimental con dos (2) factores, dos (2) niveles y tres (3) repeticiones por cada combinación. Se llevó a cabo un diseño de experimentos aleatorizado por bloques, organizado como se indica en la Tabla 2. Esta organización fue aplicada con el fin de controlar posibles variaciones debido al orden en que se realizaron las pruebas experimentales.

Tabla 2

Combinaciones experimentales, 4 bloques con 3 repeticiones cada uno

Bloque	Nomenclatura	Temperatura [°C]	Suministro energético [kWh]
Bloque 1	P1T90H	90	12.35 (Alto)
	P2T90H	90	12.35 (Alto)
	P3T90H	90	12.35 (Alto)
Bloque 2	P1T70H	70	12.35 (Alto)
	P2T70H	70	12.35 (Alto)
	P3T70H	70	12.35 (Alto)
Bloque 3	P1T70L	70	7.02 (Bajo)
	P2T70L	70	7.02 (Bajo)
	P3T70L	70	7.02 (Bajo)
Bloque 4	P1T90L	90	7.02 (Bajo)
	P2T90L	90	7.02 (Bajo)
	P3T90L	90	7.02 (Bajo)

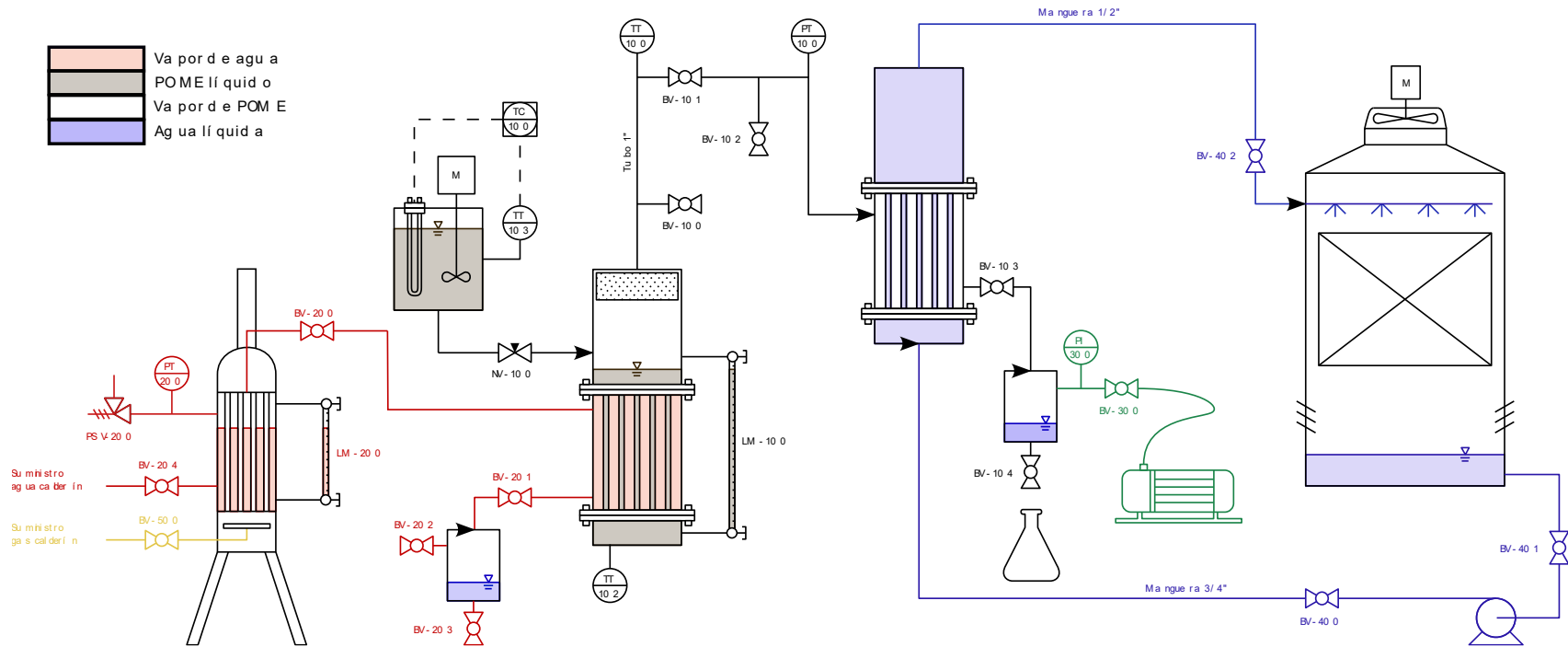
Las pruebas experimentales se identifican con una nomenclatura que indica si se trata de la prueba 1,2 o 3 dentro de cada bloque (P1, P2 o P3), la temperatura de ingreso del POME a 90 o 70°C (T90 o T70), y el suministro de energía alto o bajo (H o L). Este diseño de experimentos consideró una hipótesis nula (H_0) que sugiere que la temperatura, el consumo de gas natural o la interacción de los dos, no tiene ningún efecto sobre los resultados experimentales. Por su parte, la hipótesis alternativa (H_1) indica que alguno de los 3 factores previamente mencionados tiene un efecto significativo sobre los resultados.

3.2.5. Ejecución de los experimentos

La Figura 19 presenta un diagrama esquemático de instrumentación y tubería P&ID del banco de pruebas experimentales de evaporación al vacío.

Figura 19

Diagrama esquemático del banco de pruebas de evaporación al vacío



Para llevar a cabo los experimentos, se siguió el siguiente procedimiento en el banco de pruebas. En primer lugar, se llenó el evaporador de POME a temperatura ambiente hasta un nivel de 40 cm sobre la base del intercambiador de calandria, por medio de la tolva de alimentación. Esta operación se realizó de manera simultánea con el encendido del quemador del calderín (posicionado en la condición de alto o bajo suministro energético) para calentar el agua y producir el flujo de vapor que es suministrado al evaporador de calandria. Este fluido simula una posible energía residual del proceso de extracción de aceite de palma y es la fuente de energía suministrada al sistema de evaporación.

El siguiente paso fue cerrar la válvula de suministro (NV-100, ver Figura 19) y llenar de POME la tolva de alimentación del sistema. Seguidamente, se encendió el sistema de control de temperatura (mediante una resistencia eléctrica), y se programó para alcanzar la temperatura de entrada deseada (70 o 90°C).

Una vez calentado el efluente en la tolva de suministro, el sistema de evaporación fue evacuado mediante el uso de una bomba de vacío (Marca QUALITY modelo QVP-800). Las pruebas experimentales se llevaron a cabo con una condición de presión de vacío entre -83 y -78 kPa. Una vez que el POME alcanzaba la temperatura deseada y el calderín estaba en una condición estacionaria de flujo de vapor, se encendió la torre de enfriamiento y se iniciaba la prueba.

Como se mencionó anteriormente, las pruebas comenzaron con un nivel fijo de POME a temperatura ambiente dentro del evaporador de calandria. Dicho POME fue calentado a medida que intercambió calor con el vapor del calderín, produciendo vapor saturado que se transporta a el área de condensación, en donde el agua que circulaba por la torre de enfriamiento extrajo la energía necesaria para su condensación. En la medida que se desarrollaba este proceso, el nivel de POME

en el evaporador disminuyó, por lo que fue necesario el suministro de POME (cada vez que disminuía entre 1 y 2 cm) para mantener fijo su nivel dentro del evaporador.

La metodología de los experimentos consistió en permitir el ingreso de POME calentado al sistema para mantener su nivel fijo en el evaporador, y recolectar los condensados provenientes del condensador y del calderín cada cierto tiempo. Cada vez que se recolectaba condensado, se permitía el ingreso de efluente calentado al sistema. Se resolvió recolectar el agua destilada proveniente del condensador cada 10 minutos de prueba y el agua proveniente del calderín cada 20 minutos. Se recolectó el condensado de POME proveniente del condensador para llevar a cabo el análisis estadístico y medir la capacidad operativa del sistema. El agua proveniente del calderín se recolectó para comparar su cantidad con la de los condensados del condensador. Si las masas son similares, sugiere un sistema estacionario.

Durante la ejecución de los experimentos, se recolectaron datos de temperatura (TT-100 y TT-102) y presión (PT-100) en los puntos indicados en el diagrama de instrumentación y tubería (ver Figura 12). Estos datos se tomaron cada 3 segundos y eran almacenados automáticamente a través del datalogger de recolección de datos marca novus modelo FieldLogger novus (ver Figura 17). Se llevaron a cabo 4 corridas generales bajo las condiciones de temperatura y suministro energético indicados en cada bloque. Cada corrida duró entre 2 y 3 horas, de las cuales se seleccionó el condensado de 40 minutos de funcionamiento del banco en 3 ocasiones diferentes, después de alcanzar condiciones pseudoestacionarias.

Para recolectar el agua destilada proveniente del condensador, era necesario aislar el sistema de la zona de recolección para retirar el vacío de esta última sin afectar el del sistema. Esto se conseguía cerrando la válvula de bola BV-103 (ver Figura 19) y posteriormente abriendo las válvulas BV-300 para liberar el vacío, y BV-104 para liberar el condensado. Luego se procedía a

recolectar, pesar y registrar el condensado. Finalmente, se cerraba la válvula BV-104 para colocar la zona de recolección al vacío nuevamente, después se cerraba la válvula BV-300 y se abría la BV-103 para conectar la zona de recolección al resto del sistema para recibir los nuevos condensados.

La recolección del agua proveniente del vapor del calderín solo implicaba abrir la válvula de la zona de recolección (BV-203) en el momento de retirar el condensado, y después cerrar la misma válvula, puesto que el ingreso del vapor del calderín en el evaporador de calandria es independiente del vacío del sistema.

3.2.6. Análisis estadístico de los datos

Se llevó a cabo un análisis de varianza (ANOVA) para determinar qué tan influyentes son los factores o variables independientes sobre la cantidad de agua destilada o POME tratado en el proceso de evaporación, y para establecer si hay diferencias significativas entre las diferentes medidas. Adicionalmente, se estableció un modelo predictivo experimental cuya exactitud fue determinada según parámetros estadísticos y el análisis de residuos respecto a los resultados considerados. Este procedimiento fue efectuado por medio del entorno y lenguaje de programación R. El código generado en R para llevar a cabo el análisis estadístico se encuentra ilustrado en el anexo C.

Para realizar el análisis de varianza del diseño experimental, fue necesario evaluar algunos parámetros característicos de cada conjunto de datos. En primer lugar, se realizó la prueba de Shapiro-Wilk para comprobar la normalidad de los datos dentro de cada combinación de experimentos. Se trata de una prueba estadística que permite determinar si se cuenta con suficiente evidencia para descartar que los datos provienen de una distribución normal. Su hipótesis nula indica que los datos podrían provenir de una distribución normal, y su hipótesis alternativa lo

rechaza por completo (Montgomery & Runger, 2014). Se asumió una significancia del 5%, si el P-valor de la prueba supera este valor (0.05), se acepta la hipótesis nula. En caso de ser menor, se rechaza.

Posteriormente, se realizó la prueba de Levene para comprobar la homogeneidad de varianzas (homocedasticidad). Es decir, que cada bloque o combinación experimental tenga la misma varianza. Esta es una prueba estadística que evalúa la igualdad de varianzas entre dos o más grupos de datos. Su hipótesis nula indica que las varianzas entre los bloques son iguales, y su hipótesis alternativa indica que al menos la varianza de un bloque difiere de las demás, indicando heterocedasticidad (Montgomery & Runger, 2014). Se asumió una significancia del 5%, si el P-valor de la prueba supera este valor, se acepta la hipótesis nula. En caso de ser menor, se rechaza.

Un factor adicional por verificar es la independencia de los datos. Se asume que la aleatoriedad del diseño de experimentos garantiza este supuesto. Sin embargo, se puede verificar mediante los gráficos de residuos presentados en el análisis del ANOVA (ver sección 4.2.3.).

Una vez verificado el cumplimiento de los supuestos de los datos por analizar, se realizó un ANOVA de 2 factores con interacción. Esto con el fin de determinar si cada factor, o la interacción de estos, tuvo un efecto significativo sobre los resultados del proceso de evaporación al vacío. Por lo tanto, se considera una hipótesis nula y alternativa para cada uno, como se muestra en la Tabla 3. Al igual que en las pruebas anteriores, la selección de una u otra hipótesis se hizo teniendo en cuenta el P-valor de los factores y una significancia del 5%.

Los resultados del ANOVA se complementan posteriormente con diagramas de interacción y de cajas y bigotes. El siguiente paso es la comprobación de las hipótesis del análisis de varianza, lo cual se llevó a cabo por medio de un análisis de residuos, el cual reafirma si los resultados del ANOVA realmente se ajustan a los supuestos de normalidad y homocedasticidad. En caso de

cumplirlos, se dice que los resultados son válidos, y según los coeficientes del ANOVA, se determina qué tanto se ajusta su modelo a los resultados experimentales. La mayoría de las gráficas del análisis de residuos se apoyan sobre líneas de suavizado de Loess, que consiste en una herramienta visual que ayuda a identificar tendencias o patrones en la relación entre variables, los cuales en algunos casos son difíciles de identificar de otra forma (Wicklin, 2019).

Tabla 3

Hipótesis de la relevancia de los factores

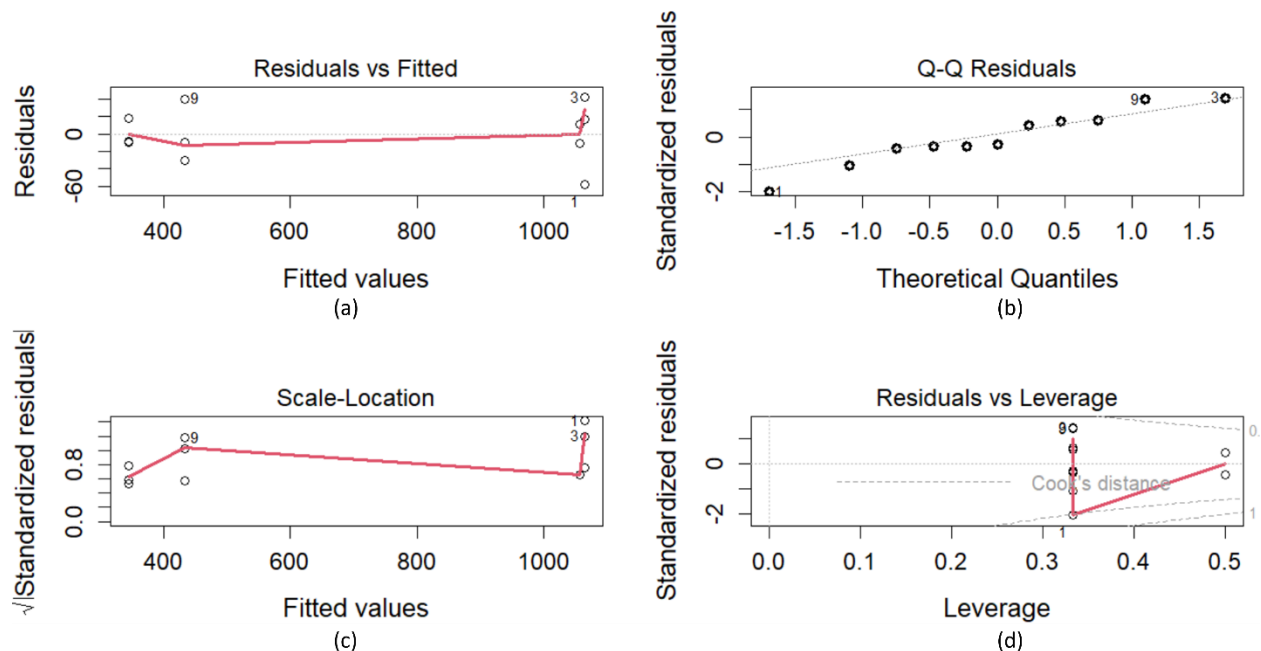
Factor	Tipo de hipótesis	Hipótesis
Temperatura de ingreso del POME	Nula	No tiene efecto sobre la cantidad de condensado total
	Alternativa	Tiene un efecto significativo sobre la cantidad de condensado total
Tasa de suministro de energía	Nula	No tiene efecto sobre la cantidad de condensado total
	Alternativa	Tiene un efecto significativo sobre la cantidad de condensado total
Interacción entre ambos factores	Nula	No hay interacción entre la temperatura y el nivel de llama
	Alternativa	Hay interacción significativa entre la temperatura y el nivel de llama

El análisis de residuos se conforma por 4 gráficos como se presenta en la Figura 20. Se cuenta con el gráfico de Residuos vs Valores ajustados (Figura 20-a) que presenta los residuos en el eje Y contra los valores ajustados del modelo en el eje X. Este diagrama ayuda a verificar la linealidad del modelo y la independencia de los datos. Su principal referencia es la línea horizontal de 0. Los residuos (puntos blancos) deberían estar igualmente distribuidos y sin ningún patrón alrededor de esta línea. En ese caso, se asume una relación lineal entre variables dependientes e

independientes, y la homocedasticidad en los residuos del modelo. Por otro lado, si los residuos presentan un patrón (por ejemplo, forma de curva), puede haber problemas de heterocedasticidad o no linealidad. Se puede referenciar también con la línea de suavizado de Loess (línea roja), si esta línea fuera curva o con una inclinación muy pronunciada, se puede interpretar un caso de heterocedasticidad o no linealidad, y se asume todo lo contrario cuando la línea de suavizado tiende a ser más horizontal (Montgomery et al., 2006).

Figura 20

Componentes del análisis de residuos



La Figura 20-b presenta el gráfico Cuantil-Cuantil, también llamado gráfico Q-Q. Este diagrama evalúa si los residuos del modelo estadístico siguen una distribución normal al comparar los residuos estandarizados (residuos del modelo ajustados para que tengan desviación estándar 1) con los cuantiles de una distribución normal teórica (media 0 y desviación estándar 1). Se referencia con la línea de normalidad, es decir, la recta punteada que atraviesa el gráfico. Si los

residuos siguen una distribución aproximadamente normal, estos deberían alinearse con tendencia de línea recta alrededor de la línea de normalidad. Si presentan curvatura o desviaciones significativas, no siguen una distribución normal (Montgomery et al., 2006).

La Figura 20-c indica el gráfico de escala-localización, el cual contrasta la raíz cuadrada de los residuos estandarizados (eje Y) contra los valores ajustados del modelo (eje X). Con este diagrama se puede verificar la homocedasticidad de los residuos a través de los valores ajustados. La línea roja del gráfico es una línea de suavizado de Loess, si esta línea es aproximadamente horizontal y los puntos están distribuidos aleatoriamente alrededor de ella, se sugiere homocedasticidad en los residuos. Si la línea de suavizado curva o presenta una tendencia de inclinación pronunciada, indica heterocedasticidad (Montgomery et al., 2006).

La Figura 20-d presenta un diagrama de residuos contra apalancamiento (leverage). Se contrastan los residuos estandarizados con respecto al apalancamiento. Este último concepto indica cuánta influencia tiene una observación individual sobre la estimación de coeficientes del modelo estadístico. El propósito de este diagrama es identificar observaciones o resultados con un alto apalancamiento, puesto que podrían tener una influencia significativa en la capacidad de ajuste del modelo. Se apoya sobre la línea de suavizado de Loess (línea roja), de forma que, si la línea es aproximadamente horizontal, el modelo ajusta adecuadamente la mayoría de las observaciones sin que ninguna presente una influencia significativa. Si presenta curvatura o una inclinación pronunciada, puede haber observaciones con residuos no aleatorios, lo cual genera una influencia de estos puntos y un efecto no deseado sobre el modelo. Adicionalmente, se interpretan las líneas de influencia o distancia de Cook (líneas punteadas en el diagrama), si la mayoría de los puntos u observaciones se encuentra dentro de estas, no hay puntos especialmente influyentes. Si se

encuentran por fuera de estas líneas, pueden presentar un alto apalancamiento y sesgar el modelo (Montgomery et al., 2006).

El análisis de residuos también se complementó con el de la distancia de Cook. Cuando la distancia de Cook de un punto es superior a 1, se considera que ese punto tiene una influencia significativa sobre el modelo de los resultados del ANOVA y puede ser buena idea eliminarlos del análisis. Sin embargo, si se tiene en cuenta que se trata con un número bajo de observaciones (12 datos o medidas en total), la influencia de un valor en la distancia de Cook ya no depende de que sea menor que 1. En su lugar, depende de que sea menor que el umbral dado por $4/n$, donde n corresponde al número de observaciones. Por ende, el umbral para una distancia de Cook aceptable es 0.33 al inicio del análisis (Montgomery & Runger, 2014).

Finalmente, teniendo clara la validez de los resultados del ANOVA, es posible construir un modelo predictivo para predecir el condensado total en función de los factores significativos. Se optó por construir un modelo de regresión lineal a través del entorno de R. Esto es debido a la simplicidad, facilidad de interpretación, y adecuación a los datos que presenta este tipo de modelos. Es decir, permite entender las relaciones entre las variables, evaluar el modelo, y realizar predicciones de forma clara y sencilla.

En un principio, se llevó a cabo el modelo de regresión lineal teniendo en cuenta todos los datos de condensado recolectados de los experimentos. También se llevó a cabo el modelo descartando 1, y posteriormente 2 datos, con base en los resultados del análisis de residuos y distancia de Cook. La sección de resultados 4.3 presenta la construcción y verificación final del modelo predictivo. Los análisis previos que se tuvieron en cuenta para descartar algunos datos se presentan en el anexo B.

Para verificar el ajuste del modelo predictivo, se tuvieron en cuenta los conceptos: Error residual estándar, coeficiente de determinación ajustado y P valor. El error residual estándar (RSE) indica la desviación de las predicciones del modelo respecto a los datos experimentales. Entre más bajo sea este valor, las predicciones se encuentran más cerca de los resultados experimentales (Montgomery et al., 2006). En este caso, indica la cantidad de gramos de condensado en promedio en que difieren los valores del modelo respecto a las muestras recolectadas de las pruebas.

El coeficiente de determinación ajustado (Adjusted R^2) indica qué porcentaje de variabilidad en la tasa de condensado es explicada por el modelo. Entre más alto sea este valor, se indica un buen ajuste del modelo a los resultados experimentales. Por último, el P valor (P-value) proporciona un indicador de si se trata de un modelo estadísticamente significativo, es decir, que sus coeficientes y las relaciones observadas son suficiente material para hacer predicciones confiables. Un P valor menor que 0.05 sugiere un modelo estadísticamente significativo (Montgomery et al., 2006).

Finalmente, se verificó el ajuste de la correlación lineal del modelo predictivo con los datos experimentales. Se tuvieron en cuenta los intervalos de confianza y predicción. El intervalo de confianza indica el ajuste del modelo a la respuesta promedio de los datos conocidos. Si los datos experimentales se encuentran dentro del intervalo de confianza, el modelo suele presentar un buen ajuste. El intervalo de predicción siempre es más amplio que el de confianza, puesto que considera más factores relacionados con la variabilidad de valores no conocidos previamente. Si la respuesta del modelo también se encuentra dentro del intervalo, es probable que la respuesta del modelo a esos valores desconocidos sea adecuada. Tanto intervalos de confianza como de predicción suelen tener un nivel de confianza del 95%. Es decir, si la respuesta del modelo se encuentra dentro de estos rangos, hay un 95% de probabilidad de que el valor de respuesta verdadero (ya sea una media

de los datos conocidos o un valor desconocido) se encuentre dentro de los respectivos intervalos (Montgomery et al., 2006).

3.3. Evaluación de desempeño del sistema

La evaluación de desempeño del sistema fue realizada mediante un balance de energía, donde se consideraron las diferentes entradas (energía química en el calderín, energía eléctrica del sistema de precalentamiento de POME y del sistema de bombeo de la torre de enfriamiento) y salidas de energía del sistema (pérdidas en gases de combustión y paredes).

Para determinar la energía química suministrada al calderín, se midió el consumo de gas natural en el calderín (equivalente a $1.58 \text{ m}^3/\text{h}$) y se asumió una composición de gas natural de 90% de Metano (CH_4) y 10% de Etano (C_2H_6). Además, mediante un balance estequiométrico se determinó la masa de aire necesaria para evaluar la combustión del gas natural y calcular las pérdidas por gases de combustión ($\%Perdidas_{chimenea}$) como se indica en la Ecuación 1, la cual tiene en cuenta la temperatura de los gases expulsados por el calderín ($T_{chimenea}$), el poder calorífico inferior del gas natural (PCI) y la masa de todos los gases presentes en el proceso de combustión (m_{gases}) (Cengel & Ghajar, 2011). Los cálculos se encuentran ubicados en el anexo D.

Ecuación 1

$$\%Perdidas_{chimenea} = \frac{q_{chimenea}}{Q_{sumin}} * 100 = \left(\frac{(T_{chimenea} - T_{ambiente}) * Cp * m_{gases}}{PCI * m_{gas\ natural}} \right) * 100$$

Posteriormente se determinó una temperatura promedio de la superficie del calderín al medir la temperatura superficial de diferentes puntos de este y se calcularon las pérdidas por convección (Q_{conv}) y radiación (Q_{rad}). La suma de estas pérdidas determina las pérdidas de energía a través de las paredes que se dan en el calderín (ver Ecuación 2). Dichas pérdidas deben

colocarse en términos de proporción del calor que se le suministra al calderín (Q_{sumin}), lo cual se indica en la Ecuación 3 (Cengel & Ghajar, 2011). El procedimiento se indica en el anexo D.

Ecuación 2

$$q_{paredes} = Q_{conv} + Q_{rad}$$

Ecuación 3

$$\%Perdidas_{paredes} = \frac{q_{paredes}}{Q_{sumin}} * 100$$

Con los resultados de la Ecuación 1 y la Ecuación 3 se obtiene la proporción total de pérdidas del proceso de combustión del calderín (ver Ecuación 4). La energía aprovechada por el calderín para obtener el vapor de agua que suministra al banco de pruebas experimentales se expresa en la Ecuación 5. Se consideró la energía que el sistema puede aprovechar en 1 hora de funcionamiento.

Ecuación 4

$$\%Perdidas = \%Perdidas_{paredes} + \%Perdidas_{chimenea}$$

Ecuación 5

$$Q_{Aprovechada} = PCI * m_{gas\ natural} * (1 - \%Perdidas) * 1\ hora$$

Para obtener el consumo energético del sistema de acondicionamiento de muestras se consideró que la resistencia eléctrica consume 10 A y el sistema de control 0.3 A. Teniendo en cuenta un voltaje de 110 V, se calculó la potencia consumida mediante la Ecuación 6 y se tuvo en cuenta el funcionamiento durante 1 hora.

Ecuación 6

$$E_{consumida}[Wh] = I [A] * V[volts] * 1\ hora$$

Se llevó a cabo el mismo procedimiento para determinar la energía consumida de la torre de enfriamiento y la bomba de vacío, teniendo en cuenta que tienen un consumo de 12 A y 8.34 A respectivamente. Los sistemas estaban sometidos a una tensión de 110 V y sus consumos fueron medidos por medio de una pinza amperimétrica FLUKE 337 durante las pruebas experimentales.

Finalmente, se calculó el rendimiento energético del sistema de evaporación al vacío en litros de POME procesado por unidad de energía consumida a través de la Ecuación 7.

Ecuación 7

$$\text{Rendimiento} = \frac{\text{Litros de POME procesado } [L_{POME}]}{\text{Consumo energético } [kWh]}$$

Con base en los resultados experimentales (ver Tabla 2) se calculó el rendimiento de las muestras de POME tratado (agua condensada) durante 40 minutos bajo el mayor suministro energético (12.35 kWh).

El cálculo del rendimiento del sistema se llevó a cabo considerando su consumo energético en 2 escenarios. El primero, teniendo en cuenta el consumo del calderín, el sistema de acondicionamiento de muestras, la bomba de vacío y la torre de enfriamiento. El segundo, únicamente con el consumo de la torre de enfriamiento y la bomba de vacío. En este último escenario no se considera la energía consumida por el calderín, debido a que las plantas de extracción de aceite de palma cuentan con energía térmica residual que podría ser aprovechada para llevar a cabo el proceso de evaporación (Ngan, 2000).

3.4. Desarrollo de un modelo matemático de transferencia de calor

Adicional al trabajo experimental presentado previamente, fue desarrollado un modelo térmico del proceso con el objetivo de identificar el rendimiento teórico del sistema de evaporación

utilizando intercambiadores de calor tipo calandria. Estos modelos tienen en cuenta los cambios de fase que se presentan durante el desarrollo de las pruebas.

Los fenómenos térmicos de intercambio de energía en esta aplicación implican transformaciones de estado de los fluidos involucrados: procesos de condensación y ebullición. Estos fenómenos son considerados como formas de transferencia de calor por convección, puesto que se relacionan con el movimiento de un fluido (Cengel & Ghajar, 2011).

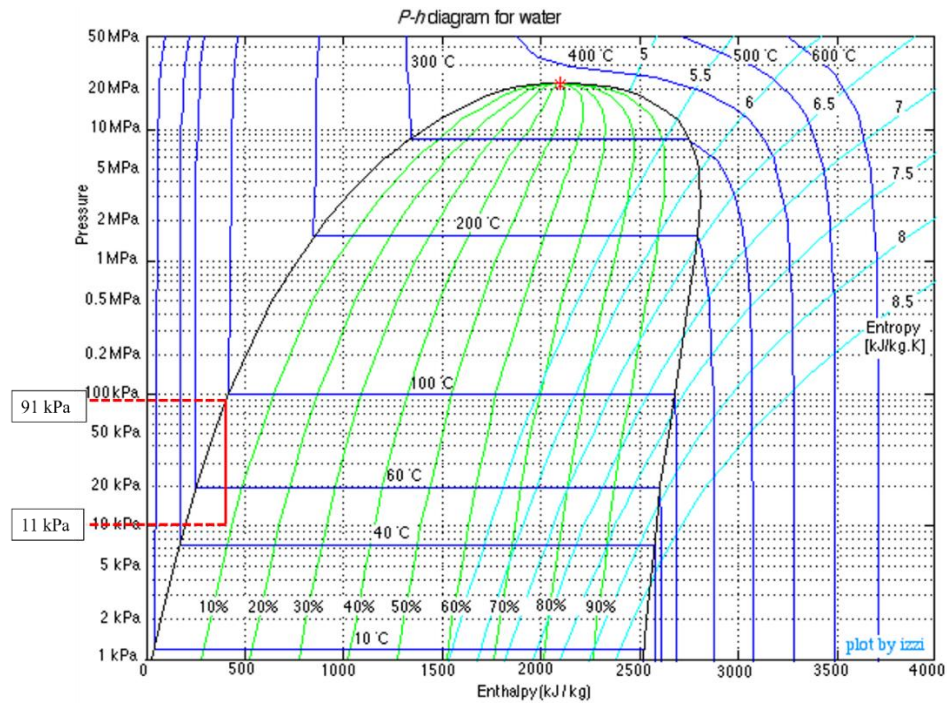
3.4.1. Consideraciones previas

El modelo térmico teórico fue desarrollado teniendo en cuenta las suposiciones: cálculos del sistema en estado estable, análisis cero dimensional, aproximación de las propiedades del POME a las del agua, sistema de tuberías de POME aislado (se desprecian pérdidas de calor con el ambiente).

Los resultados del modelo corresponden a condiciones de 90°C de entrada de POME y el suministro energético más alto. Es decir, el POME ingresa a 90°C desde la tolva de alimentación (a presión ambiente) hacia un sistema que se encuentra al vacío mediante la apertura de una válvula de suministro. Esto conlleva un proceso de expansión isoentálpico (sin cambio energético en el fluido) que no solo somete al efluente a una disminución de presión, sino también de temperatura (Ponce, 2017). La Figura 21 muestra el proceso isoentálpico que sufre el POME (en condición líquida a 90°C) a través de la válvula, en donde se expande hasta una presión de vacío de 80 kPa. Como resultado, se estima que el efluente ingresa al sistema de evaporación al vacío con una temperatura de 45°C y una calidad el 10%. El volumen de control del proceso a través de la válvula de expansión NV-100 se ilustra en la Figura 22.

Figura 21

Diagrama de presión contra entalpía del agua

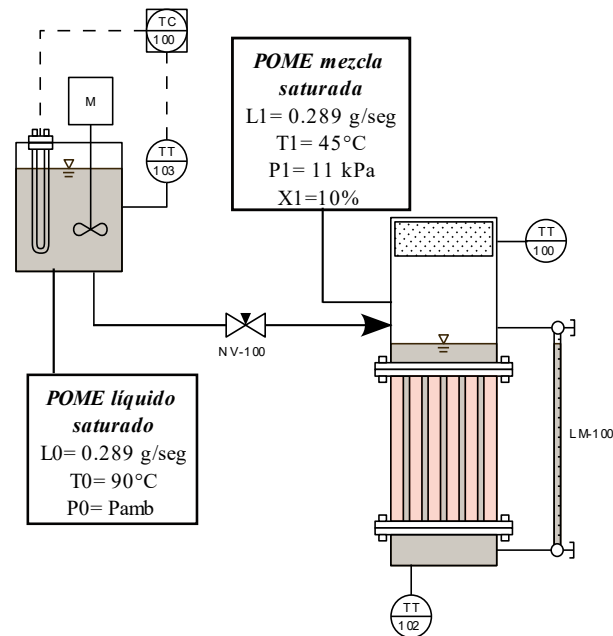


Nota. Tomado de: *p-h diagram for wáter* (s.f), por Ohio University.

https://people.ohio.edu/tremblay/mechanical/thermo/property_tables/H2O/ph_water.html

Figura 22

Volumen de control del proceso de expansión isoentálpica del POME

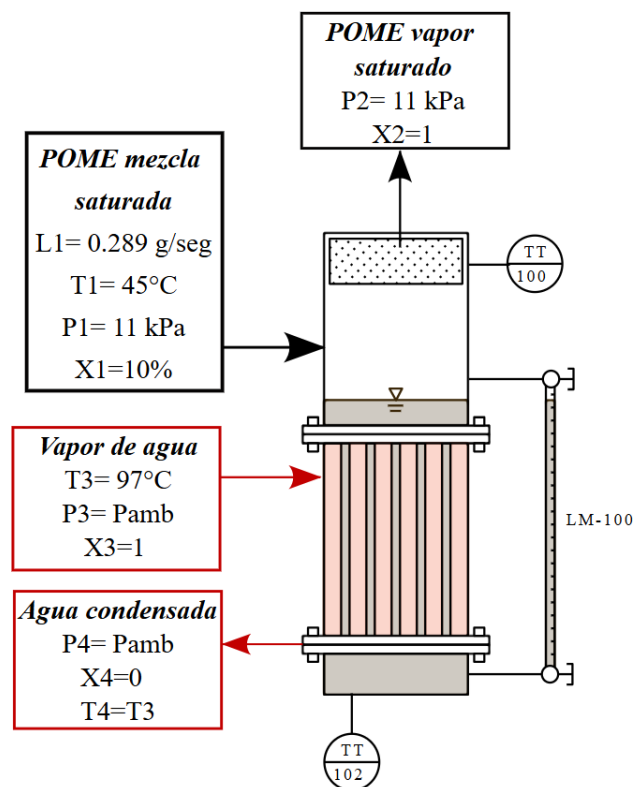


3.4.2. Análisis térmico del evaporador de calandria

El desarrollo del modelo teórico de transferencia de calor del evaporador de Calandria se llevó a cabo teniendo en cuenta el volumen de control presentado en la Figura 23. La presión dentro del sistema y la temperatura de ingreso del POME fueron explicados en la sección 3.4.1. Luego de alcanzar el estado de vapor saturado, el efluente se encuentra a la temperatura de saturación del agua bajo la presión absoluta de 11 kPa. El flujo de vapor proveniente del calderín se encuentra a presión atmosférica (91 kPa) y a la temperatura de saturación del agua bajo la misma presión (97.02°C).

Figura 23

Volumen de control del evaporador de Calandria del sistema de evaporación al vacío



3.4.2.1. Ebullición en la superficie interior de los tubos del evaporador. El flujo de calor en la ebullición se da con base en la ley de enfriamiento de Newton, como se presenta en la Ecuación 8 (Cengel & Ghajar, 2011).

Ecuación 8

$$\dot{q}_{ebullición} = h * (T_{sup} - T_{sat}) = h * \Delta T_{exc}$$

Donde, T_{sup} hace referencia a la temperatura de la superficie sólida que estaría por encima de la temperatura de saturación del fluido (T_{sat}). La diferencia entre estas se conoce como temperatura de exceso (ΔT_{exc}). El coeficiente h indica el coeficiente de transferencia de calor por convección en el flujo de calor de la ebullición ($\dot{q}_{ebullición}$).

En primer lugar, se identifica que el evaporador de Calandria presenta una ebullición en estanque (“pool boiling”), es decir, de un fluido estacionario.

El modelo matemático del evaporador se llevó a cabo considerando el régimen de ebullición nucleada, el cual presenta altas tasas de transferencia de calor considerando temperaturas de exceso entre 5 y 30°C. Esta consideración fue tomada una vez que el fluido de suministro que calienta el POME (vapor saturado a presión ambiente) se encuentra a la temperatura 97°C aproximadamente y el efluente dentro de los tubos del evaporador se encuentra a una temperatura de 45°C. Se asumió una temperatura de exceso baja (≈ 5) teniendo en cuenta una temperatura de saturación del POME de 48°C y que el sistema generalmente permaneció por debajo de los 55°C durante las pruebas.

La Ecuación 9 presenta la correlación de flujo de calor en ebullición nucleada propuesta por Rohsenow con base en datos experimentales. Esta es una de las ecuaciones más usadas en este régimen en respuesta a la dificultad para desarrollar relaciones teóricas (Cengel & Ghajar, 2011).

La Tabla 4 presenta el significado de las variables de esta correlación junto con el valor de algunas propiedades, cuya obtención se indica en el anexo E.

3.4.2.2. Condensación en la superficie exterior de los tubos del evaporador. La condensación del vapor saturado proveniente del calderín ocurre al entrar en contacto con la superficie exterior de los tubos del evaporador, cuya temperatura está por debajo de la temperatura de saturación del vapor. Dado que la superficie no tiene ningún revestimiento hidrofóbico se considera una condensación fílmica o en película.

Cuando se condensa una unidad de masa de vapor, esta transferencia de calor suele ser representada por el calor latente o entalpía de vaporización (h_{fg}). Sin embargo, en un proceso de condensación real el condensado se subenfía, lo cual indica que también transfiere una fracción de calor sensible. Esto implica una mayor transferencia de calor, y se cuenta con otra correlación de Rohsenow para incluir este efecto (ver Ecuación 10). Esta ecuación representa el calor latente de vaporización modificado (h_{fg}^*), que tiene en cuenta la entalpía de vaporización previa (h_{fg}), el calor específico del líquido a la temperatura promedio de película (c_{pl}), y la diferencia entre la temperatura de saturación del vapor y de la superficie de los tubos del evaporador (Cengel & Ghajar, 2011).

Ecuación 9

$$\dot{q}_{nucleada} = \mu_l * h_{fg} * \left[\frac{g * (\rho_l - \rho_v)}{\sigma} \right]^{\frac{1}{2}} * \left[\frac{c_p * (T_{Sup} - T_{Sat})}{C_{sf} * h_{fg} * Pr^n} \right]^3$$

Tabla 4

Componentes de la correlación de Rohsenow para ebullición nucleada

Símbolo	Concepto	Valor	Unidad
$\dot{q}_{nucleada}$	Flujo de calor en la ebullición nucleada	-	W/m^2
μ_l	Viscosidad del líquido	5.963E-4	$kg/m * s$
h_{fg}	Entalpía de vaporización	2.403E+6	J/kg
g	Aceleración gravitacional	9.81	m/s^2
ρ_l	Densidad del líquido	990.2	kg/m^3
ρ_v	Densidad del vapor	0.074	kg/m^3
σ	Tensión superficial de la interfase líquido-vapor	0.068	N/m
c_p	Calor específico del líquido	4182	$J/kg * ^\circ C$
T_{Sup}	Temperatura superficial del calentador	53.19	$^\circ C$
T_{Sat}	Temperatura de saturación del fluido	47.69	$^\circ C$
C_{sf}	Constante experimental	0.013	
Pr	Número de Prandtl del líquido	3.994	
n	Constante experimental del fluido	1	

Ecuación 10

$$h_{fg}^* = h_{fg} + 0.68 * c_{pl} * (T_{sat} - T_{sup})$$

Finalmente, se considera la Ecuación 11 para determinar el coeficiente de transferencia de calor promedio para la condensación en película laminar sobre una placa plana vertical, la cual también aplica para la transferencia de calor en tubos verticales (Cengel & Ghajar, 2011). Los componentes de esta ecuación se explican en la Tabla 5, también se presenta el valor de algunas de las propiedades consideradas (ver su origen en el anexo E).

Ecuación 11

$$h = 0.943 * \left[\frac{g * \rho_l * (\rho_l - \rho_v) * h_{fg}^* * k_l^3}{\mu_l * (T_{sat} - T_s) * L} \right]^{\frac{1}{4}}$$

Tabla 5

Componentes del coeficiente de transferencia de calor promedio para la condensación en película laminar sobre una placa vertical

Símbolo	Concepto	Valor	Unidad
h	Coefficiente de transferencia de calor	-	$W/m^2 * ^\circ C$
g	Aceleración gravitacional	9.81	m/s^2
ρ_l	Densidad del líquido	960.5	kg/m^3
ρ_v	Densidad del vapor	0.54	kg/m^3
h_{fg}^*	Calor latente de vaporización modificado	2.39E+6	J/kg
k_l	Conductividad térmica del líquido	0.664	$W/m * ^\circ C$
μ_l	Viscosidad del líquido	2.909E-4	$kg/m * s$
T_{sat}	Temperatura de saturación del fluido condensándose	97.02	$^\circ C$
T_s	Temperatura superficial de la placa	53.19	$^\circ C$
L	Altura de la placa vertical	0.3	m

Teniendo en cuenta los fenómenos de transferencia de calor indicados en la Ecuación 9 y Ecuación 11, se estableció un modelo matemático para estimar y analizar las características operativas del evaporador del sistema de evaporación al vacío. Este modelo tiene en cuenta el coeficiente global de transferencia de calor en función de las resistencias térmicas por convección y conducción. Esto se indica en la Ecuación 12, Ecuación 13 y Ecuación 14. Los resultados se presentan en el anexo E.

Ecuación 12

$$Q = U * A * LMTD$$

Ecuación 13

$$U = \frac{1}{R_{total} * A}$$

Ecuación 14

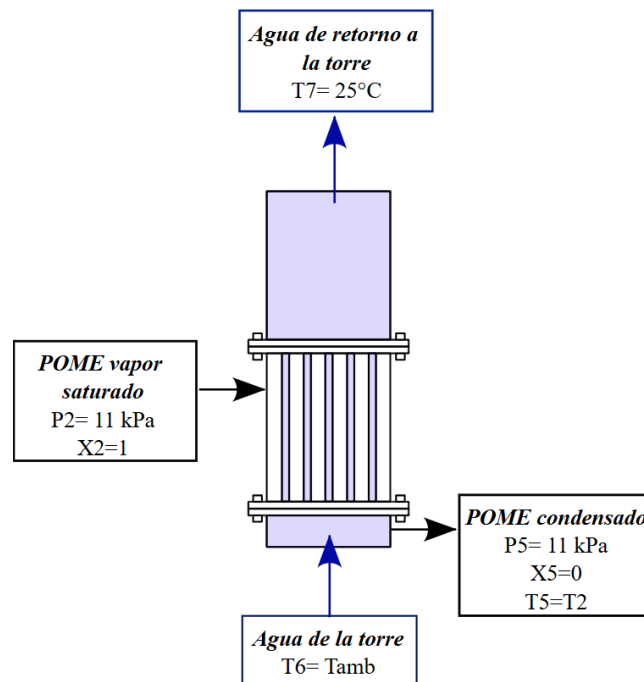
$$R_{total} = R_{conv.int} + R_{Cond} + R_{conv.ext} = \frac{1}{h_{int}} + \frac{\ln\left(\frac{d_{ext}}{d_{int}}\right)}{k * 2\pi * L * n_{tubos}} + \frac{1}{h_{ext}}$$

3.4.3. Análisis térmico del condensador

El desarrollo del modelo teórico del condensador del sistema se llevó a cabo teniendo en cuenta el volumen de control presentado en la Figura 24. El POME permanece en su temperatura de saturación bajo la presión absoluta durante la entrada y salida del condensador. El agua de la torre de enfriamiento se encuentra a temperatura ambiente antes de entrar a los tubos del condensador. Al salir de ellos, luego de la transferencia de calor, se asume que alcanza una temperatura de 25°C con base en los apuntes de Gómez (2021).

Figura 24

Volumen de control del condensador del sistema de evaporación al vacío



3.4.3.1. Condensación en la superficie externa de los tubos. El flujo de POME que fue evaporado ingresa al condensador del sistema de evaporación de simple efecto. Posteriormente entra en contacto con la superficie exterior de los tubos en cuyo interior circula el agua de la torre de enfriamiento. Esto provoca el fenómeno de condensación de película discutido anteriormente.

De este modo, el análisis para la transferencia de calor que se da por fuera de los tubos del condensador se realiza aplicando los mismos conceptos y ecuaciones contemplados en la sección 3.4.2.2. Al igual que en la sección anterior, la Tabla 6 presenta los valores de las propiedades que fueron consideradas para este fenómeno de condensación.

Tabla 6

Propiedades de la condensación en película presentada en el condensador

Símbolo	Valor	Unidad
h	-	$W/m^2 * ^\circ C$
g	9.81	m/s^2
ρ_l	988	kg/m^3
ρ_v	0.083	kg/m^3
h_{fg}^*	2.438E+6	J/kg
k_l	0.630	$W/m * ^\circ C$
μ_l	5.471E-4	$kg/m * s$
T_{sat}	47.69	$^\circ C$
T_s	28	$^\circ C$
L	0.3	m

3.4.3.2. Transferencia de calor hacia el agua de la torre de enfriamiento. La transferencia de calor hacia el agua de enfriamiento se consideró como un fenómeno de convección interna forzada debido a la presencia de la bomba que impulsa el fluido de la torre de enfriamiento. En este caso no se presenta cambio de fase. Además, dado que el cambio de temperatura del agua a la entrada y salida del condensador no es muy alto, se considera una temperatura superficial de los tubos constante.

En primer lugar, se identificó el tipo de flujo que presenta el agua de la torre de enfriamiento al atravesar el condensador. Se calculó el número de Reynolds como se indica en la Ecuación 15, que está en función de la velocidad de flujo a través de la sección transversal de los tubos del condensador (V), el diámetro interno de los tubos (d), la densidad (ρ) y viscosidad dinámica (μ) del fluido (Cengel & Ghajar, 2011).

Ecuación 15

$$Re = \frac{V * d * \rho}{\mu}$$

El número de Reynolds calculado indica un flujo de transición, el cual se encuentra cercano a los parámetros del flujo laminar. Por lo tanto, se asumieron características de flujo laminar en la torre de enfriamiento. También se determinó el número de Nusselt (ver Ecuación 16) para considerar el coeficiente de convección interna h_{int} dentro de los tubos del condensador. Este factor está en función del diámetro interno de los tubos (d_{int}) y la conductividad del fluido (k) que circula por el intercambiador.

Ecuación 16

$$Nu = \frac{h_{int} * d_{int}}{k}$$

Se calculó el inverso del número de Graetz (ver Ecuación 17) para determinar si se trataba de flujo laminar en la región de entrada o completamente desarrollada. El número de Graetz depende de la longitud (L), diámetro de los tubos (d), número de Reynolds (Re) y de Prandtl (Pr). Si el inverso de este número es mayor que 0.05 el flujo se considera completamente desarrollado (Cengel & Ghajar, 2011).

Ecuación 17

$$\frac{1}{Gz} = \frac{L/d}{Re * Pr}$$

Se determinó un flujo laminar en la región de entrada. Por lo tanto, se calculó el número de Nusselt como se indica en la Ecuación 18, la cual se encuentra bajo los mismos parámetros del número de Graetz (Cengel & Ghajar, 2011).

Ecuación 18

$$Nu = 3.66 + \frac{0.065 * \left(\frac{d}{L}\right) * Re * Pr}{1 + 0.04 * \left[\left(\frac{d}{L}\right) * Re * Pr\right]^{2/3}}$$

Al igual que con el evaporador de Calandria, se estableció un modelo matemático para estimar y analizar las características operativas del condensador del sistema de evaporación al vacío. Este modelo también tiene en cuenta el coeficiente global de transferencia de calor en función de las resistencias térmicas por convección y conducción. Los cálculos se presentan en el anexo E.

3.4.4. Análisis de resultados de los modelos del sistema de evaporación

Con base en los resultados de los modelos térmicos teóricos, se identificó si los intercambiadores presentan una tasa de transferencia de calor alta o baja a través del coeficiente global de transferencia de calor (U), los coeficientes convectivos y el régimen en el que se

encuentran los respectivos fluidos (ebullición nucleada, flujo laminar, etc.). Estas conclusiones se compararon con lo que se observó durante la operación del banco para identificar sus oportunidades de mejora.

3.5. Análisis de laboratorio de las muestras de POME

El POME con el que se efectuaron los experimentos proviene de una planta de beneficio de extracción de aceite de palma ubicada en San Martín, Cesar. Por medio de la empresa PHINA BIOSOLUCIONES S.A.S, fue posible conseguir el efluente y enviar muestras de este antes y después de llevar a cabo los experimentos al laboratorio certificado ECOSAM S.A.S.

El laboratorio llevó a cabo análisis fisicoquímicos para cuantificar la concentración de DQO, DBO₅ y cloruros en el POME sin ningún tratamiento previo, y los subproductos del proceso de evaporación al vacío que resultan de las pruebas experimentales (lodos concentrados y agua destilada). Estos resultados se contrastan con los parámetros de la resolución 0631 del 2015 (ver Tabla 1) para verificar si se cumple con lo establecido en la normativa ambiental vigente sobre el vertimiento de aguas residuales en fuentes hídricas. Los detalles sobre estos análisis se presentan en el anexo F.

4. Análisis y resultados

4.1. Resultados de los experimentos

A continuación, se presentan los resultados y discusiones del desempeño de las pruebas experimentales desarrolladas para las combinaciones propuestas.

4.1.1. Cambios de fase de los fluidos involucrados

Los estados que alcanza el POME dentro del banco de laboratorio se explican en el diagrama termodinámico de temperatura contra entropía de la Figura 25. El estado 1 representa el POME en estado de líquido saturado cuando se encuentra en el sistema de acondicionamiento de muestras a cierta temperatura de precalentamiento y presión ambiente. En el estado 2, atraviesa el proceso de expansión isoentálpica explicado en la sección 3.4.1 para ingresar al sistema, en el cual disminuyen su temperatura y presión. En el estado 3, el POME permanece en estado de mezcla saturada con cierto porcentaje de calidad dentro del evaporador. En el estado 4 presenta el POME en condición de vapor saturado, cuando transita por las tuberías del sistema. El estado 5 se da después de atravesar el condensador, recuperando el estado de líquido saturado. Finalmente, el estado 6 de líquido comprimido a temperatura y presión ambiente en el momento de extracción.

La Figura 26 presenta una comparativa entre el POME que ingresa al sistema y los condensados obtenidos después de evaporar y condensar al vacío dicho POME.

Figura 25

Estados del POME durante las pruebas experimentales

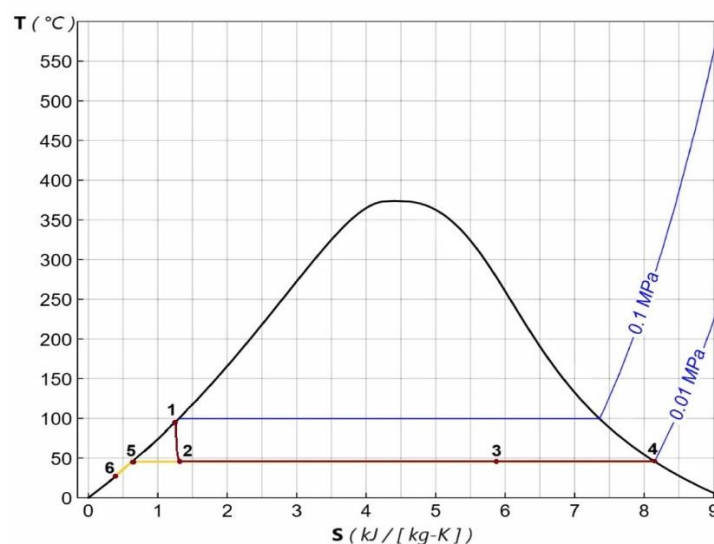


Figura 26

Comparativa entre el POME que ingresa al sistema y los condensados recolectados del condensador

**4.1.2. Análisis de resultados del tratamiento del POME mediante la evaporación al vacío**

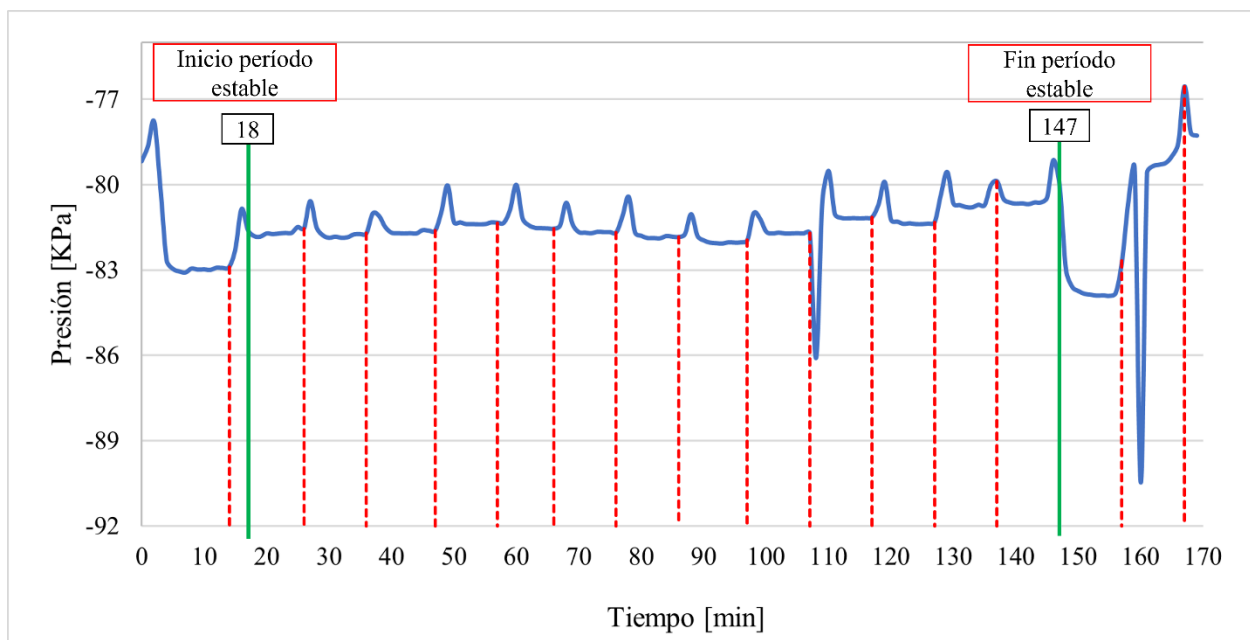
La Figura 27 y Figura 28 presentan los resultados de las pruebas de depuración del POME mediante la técnica de evaporación al vacío bajo las condiciones de 70°C de temperatura de entrada de POME y alto suministro de energía. Las pruebas se realizaron en un tiempo promedio de 3 horas y presentaron una buena reproducibilidad. En estos experimentos se obtuvieron un total de 4320 mL de condensado del POME provenientes del condensador. Los condensados se encontraban a temperatura ambiente en el momento de extracción.

En la Figura 27 y Figura 28 se identifica que el sistema tomó alrededor de 18 minutos para alcanzar un periodo pseudoestacionario, el cual se mantuvo hasta el minuto 147. Siendo así, la presión y la temperatura en el sistema permanecieron relativamente estables en un rango de valores entre -83 y -80 kPa de vacío, y entre 43 y 48°C durante aproximadamente 2 horas. También se observó que después del minuto 147, tanto la presión como la temperatura presentaron una

variación considerable que se puede atribuir a alguna falla en la lectura de los sensores o en su cableado durante este momento de la prueba, puesto que se trata de valores muy altos o bajos que se alcanzan en lapsos de tiempo muy cortos. Esto último se justifica especialmente por la Figura 27, debido a que sus picos alcanzan valores de vacío que no fueron proporcionados por la bomba en ningún momento de las pruebas.

Figura 27

Comportamiento de la presión durante las pruebas con temperatura de suministro de POME de 70°C y alto consumo de energía



Nota. El tiempo de estabilización del sistema se identifica a los 18 minutos

Figura 28

Comportamiento de la temperatura durante las pruebas con temperatura de suministro de POME de 70°C y alto consumo de energía

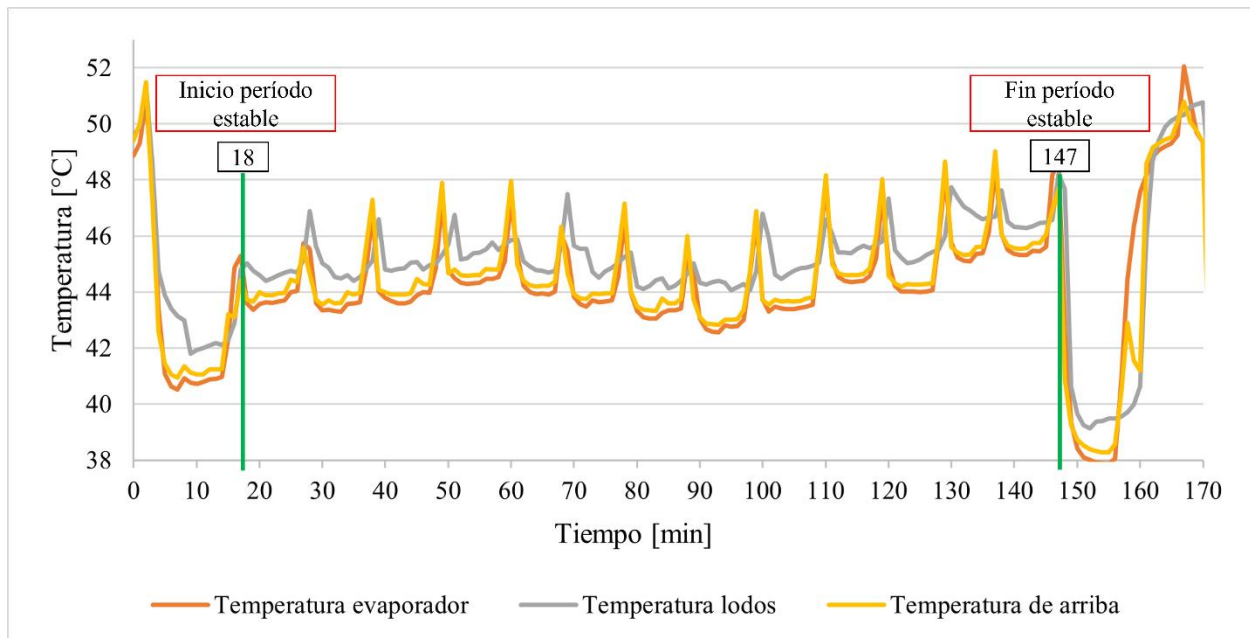
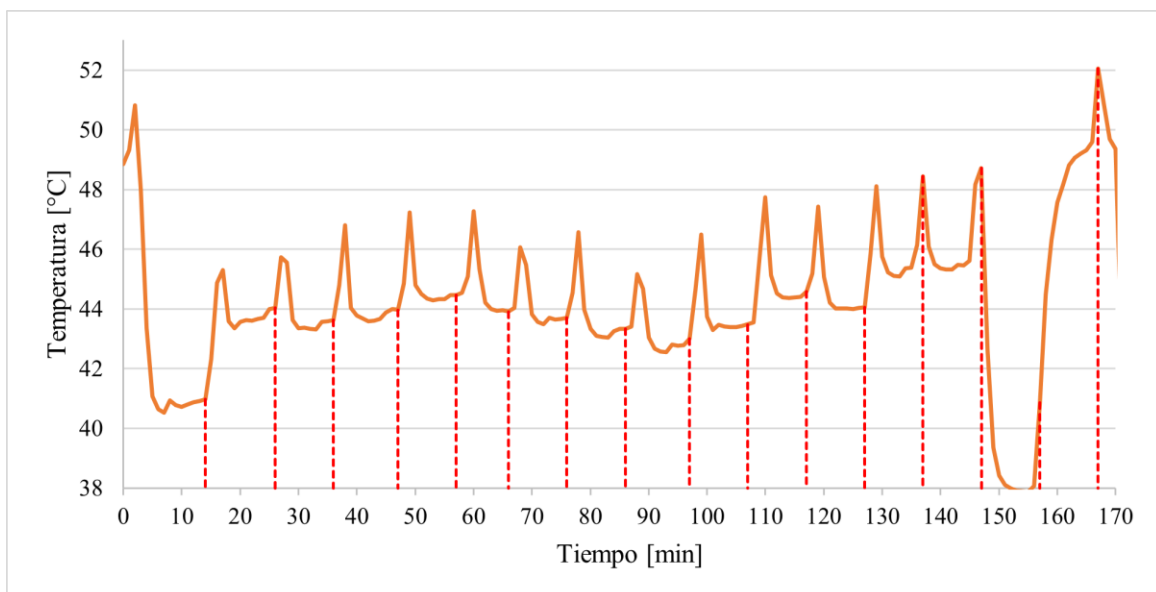


Figura 29

Comportamiento de la temperatura del evaporador durante las pruebas con temperatura de suministro de POME de 70°C y alto consumo de energía



Una observación adicional es que tanto en la temperatura como en la presión se observan picos durante el periodo estable. Esto es debido a la extracción de los condensados provenientes

del condensador. Como se explicó en la metodología, al retirar el condensado es necesario aislar el sistema de la zona de retiro para conservar el vacío. Mientras se llevaba a cabo la recolección, se presentó un leve incremento tanto en la presión como en la temperatura. Una vez que se conseguía el condensado, la zona de recolección se colocaba al vacío nuevamente y se reincorporaba al sistema. Durante esta operación, la presión y la temperatura volvían a bajar y se mantenían en el rango del periodo estable. En la Figura 27, Figura 29, Figura 30, y Figura 31 se observan líneas rojas verticales, las cuales indican los periodos de recolección de condensado, y su coincidencia con los picos indicados.

Figura 30

Comportamiento de la temperatura por encima del evaporador durante las pruebas con temperatura de suministro de POME de 70°C y alto consumo de energía

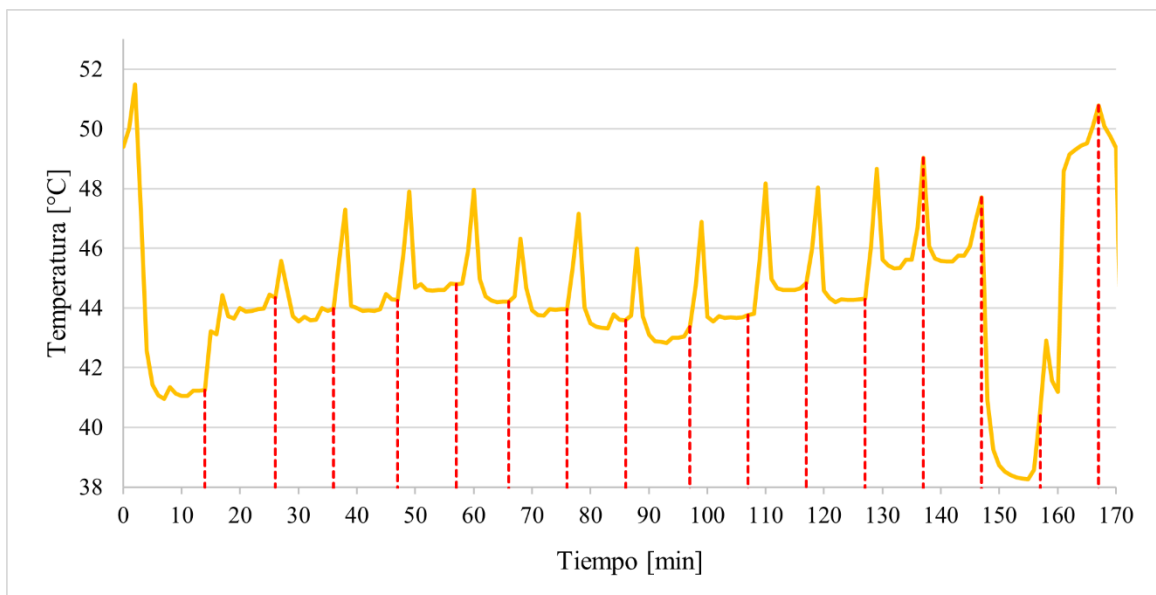
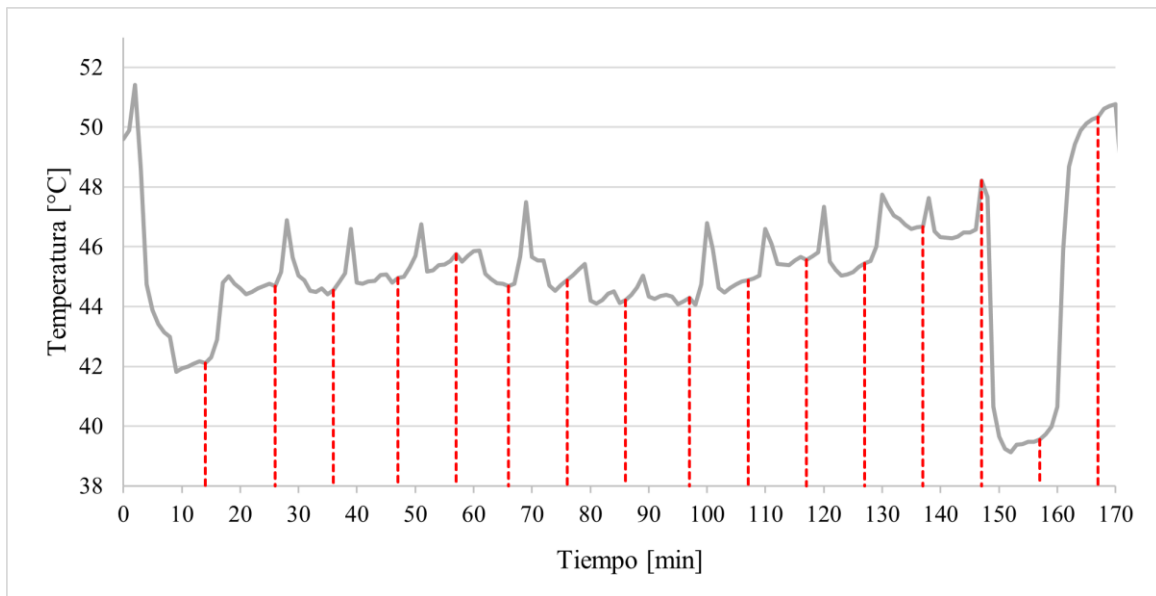


Figura 31

Comportamiento de la temperatura de los lodos durante las pruebas con temperatura de suministro de POME de 70°C y alto consumo de energía



En la Tabla 7 se presentan las operaciones relevantes del desarrollo de las pruebas P1T70H, P2T70H, y P3T70H (ver Tabla 2) correspondientes a las condiciones de temperatura de entrada de POME de 70°C con el mayor suministro energético. En esta tabla se presentan los momentos de recolección de condensados provenientes del condensador (m1) y del calderín (m2), junto con el total acumulado de cada uno en kg de agua. También se indican el inicio y fin de la prueba, y del periodo estacionario. Durante toda la prueba, cada vez que se hacía la recolección de condensados, se permitía el ingreso de POME calentado al sistema con el fin de mantener una cantidad fija del efluente dentro del evaporador.

Al igual que con la presión y la temperatura, la Figura 32 presenta cierta uniformidad en los condensados recolectados del condensador durante el periodo estable.

Una observación adicional es que la masa total de condensados provenientes del vapor del calderín es muy similar a la masa total de condensados provenientes del condensador. Esto indica que se trata de un sistema estacionario. Por lo tanto, el calor que entra al sistema por medio del

flujo de vapor para evaporar el POME es equivalente al calor que sale del sistema por medio del flujo de agua de la torre de enfriamiento para condensar el vapor del POME (ver Figura 33).

Tabla 7

Operaciones relevantes durante las pruebas con temperatura de suministro de POME de 70°C y alto suministro de energía

t (min)	Descripción	m1 (kg)	m2 (kg)
0	Comienza la prueba	0	0
14	1ra extracción de condensado	412	0
18	Inicia periodo estacionario	412	0
26	2da extracción de condensado y 1ra del calderín	667	292
36	3ra extracción de condensado	932	292
47	4ta extracción de condensado y 2da del calderín	1210	902
57	5ta extracción de condensado y 3ra del calderín	1480	1239
66	6ta extracción de condensado	1718	1239
76	7ma extracción de condensado y 4ta del calderín	1961	1850
86	8va extracción de condensado	2239	1850
97	9na extracción de condensado y 5ta del calderín	2509	2350
107	10ma extracción de condensado	2764	2350
117	11va extracción de condensado y 6ta del calderín	2988	2921
127	12va extracción de condensado y 7ma del calderín	3238	3223
137	13va extracción de condensado	3467	3223
147	14va extracción de condensado y 8va del calderín	3692	3696
147	Finaliza el periodo estable	3692	3696
157	15va extracción de condensado	4076	3696
167	16va extracción de condensado y 8va del calderín	4320	4195
167	Fin de la prueba	4320	4195

Figura 32

Comportamiento de la extracción de condensados del condensador durante las pruebas con temperatura de entrada de POME de 70°C y alto suministro de energía

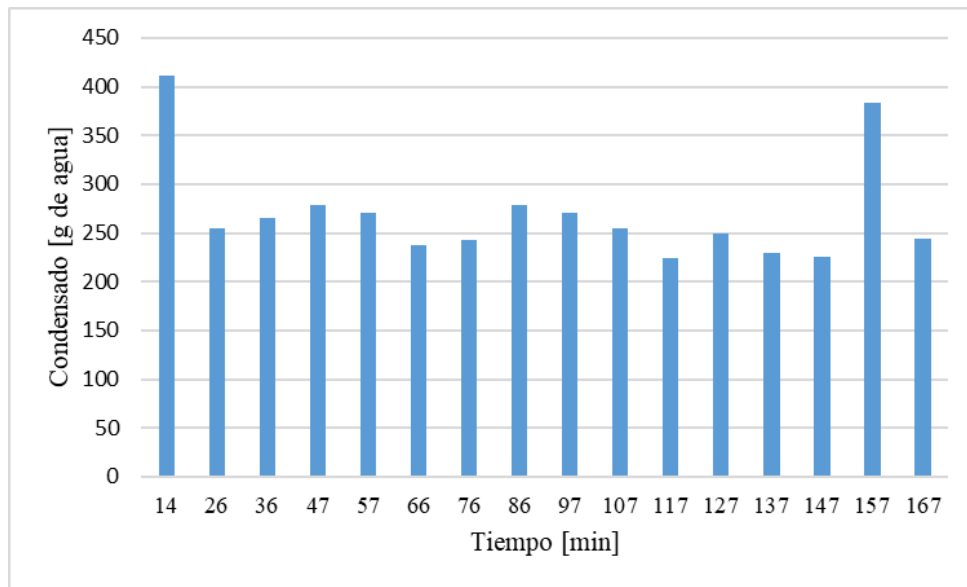
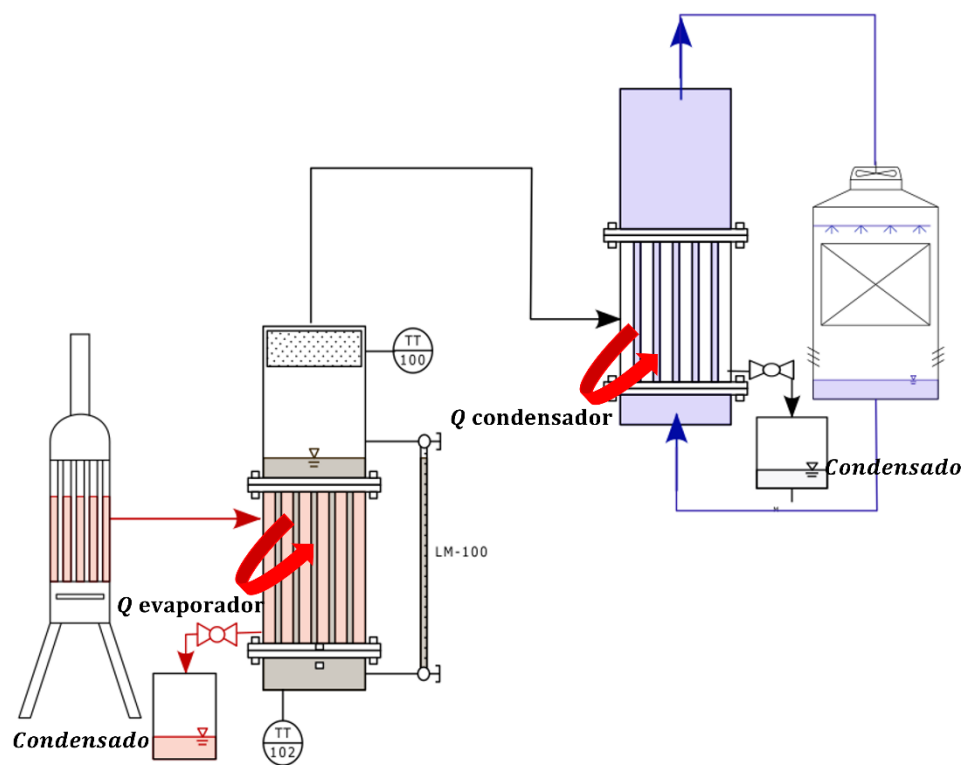


Figura 33

Sistema estacionario



Nota: El calor transferido del evaporador es similar al del condensador.

El análisis de los resultados de las otras tres combinaciones experimentales es bastante similar a lo presentado de las pruebas con temperatura de entrada de POME de 70°C y alto suministro de energía. Es decir, sus tendencias son similares. Por lo tanto, estos resultados se presentan en el anexo A.

4.2. Análisis de varianza (ANOVA)

Los resultados de la Tabla 8 presentan las muestras de condensado recolectado del condensador del sistema sobre las cuales se llevó a cabo el análisis estadístico. Se conserva la nomenclatura de las pruebas presentada en la Tabla 2.

Tabla 8

Muestras de condensado provenientes de las pruebas experimentales

Temperatura [°C]	Suministro de energía [kWh]	Agua del condensador [g]	Nomenclatura
90	12.35	1006	P1T90H
90	12.35	1081	P2T90H
90	12.35	1106	P3T90H
70	12.35	1068	P1T70H
70	12.35	1046	P2T70H
70	12.35	928	P3T70H
70	7.02	402	P1T70L
70	7.02	423	P2T70L
70	7.02	473	P3T70L
90	7.02	336	P1T90L
90	7.02	334	P2T90L
90	7.02	362	P3T90L

4.2.1. Verificación de supuestos

4.2.1.1. Normalidad de los datos por grupo. La prueba de Shapiro-Wilks se realizó a cada uno de los 4 bloques en el software y lenguaje de programación R. Los resultados se presentan en la Tabla 9.

Tabla 9

Resultados de la prueba estadística Shapiro-Wilk

Bloque	W valor Shapiro-Wilks	P valor Shapiro-Wilks
90°C Alto suministro	0.9231	0.4633
70°C Alto suministro	0.8645	0.2801
70°C Bajo suministro	0.9473	0.5577
90°C Bajo suministro	0.8033	0.1223

Asumiendo un valor de significancia del 5% (0.05) y observando que el P-valor de cada bloque es superior a esta cifra, se determinó que no se cuenta con suficiente evidencia para descartar que los datos provienen de una distribución normal, aceptando la hipótesis nula de la prueba para cada bloque.

4.2.1.2. Homogeneidad de varianzas. Los resultados de la prueba de Levene se presentan en la Tabla 10.

Tabla 10

Resultados de la prueba de Levene

Grados de libertad	F valor	P valor
3	0.4772	0.7069
8		

Nota. La prueba se realizó en el entorno y lenguaje de programación R.

Asumiendo una significancia del 5% y observando que el P-Valor supera esta cifra, Se acepta la hipótesis nula. Por lo tanto, no hay suficiente evidencia estadística para descartar que los bloques tengan la misma varianza.

4.2.2. Resultados del ANOVA

Los resultados del ANOVA se presentan en la Tabla 11.

Tabla 11

Resultados del ANOVA

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Temperatura	1	1102	1102	0.443	0.5244
Energia	1	1270752	1270752	510.821	1.56E-08
Temperatura:Energia	1	14491	14491	5.825	0.0423
Residuals	8	19901	2488		

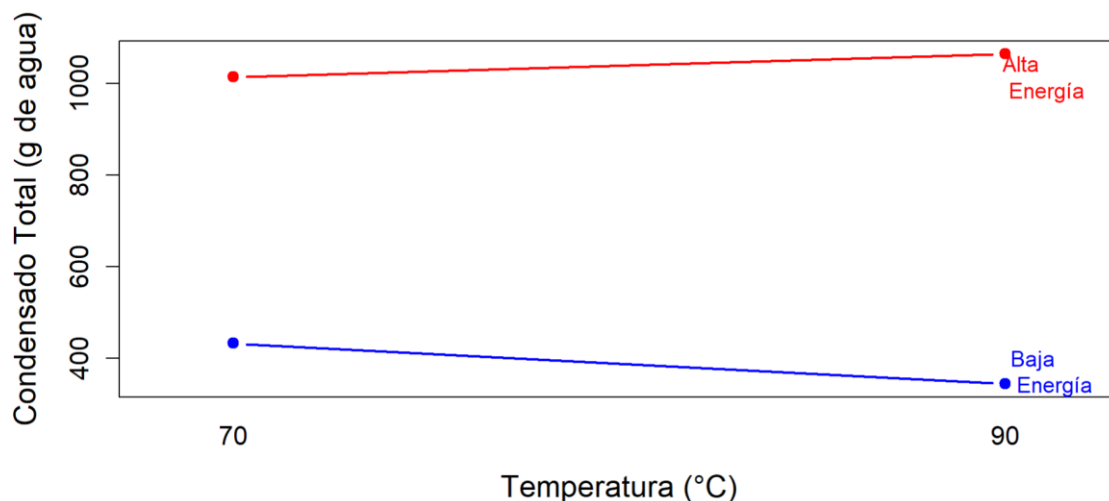
Nota. se realizó en el entorno y lenguaje de programación R.

Según los resultados presentados en la Tabla 11, la temperatura de entrada del POME por sí sola no tiene un efecto significativo sobre la cantidad de condensado total (hipótesis nula). En cambio, el suministro energético sí presenta un efecto altamente significativo sobre el total de condensado (POME tratado), según lo bajo que es su P-valor (hipótesis alternativa). Por último, sí hay una interacción significativa entre el suministro energético y la temperatura de ingreso del POME (hipótesis alternativa). Esto indica que el efecto del suministro energético sobre el condensado total es afectado por la temperatura de entrada del POME.

Los gráficos de la Figura 34 y Figura 35 proporcionan una visualización de los efectos principales de los factores y la interacción entre ellos.

Figura 34

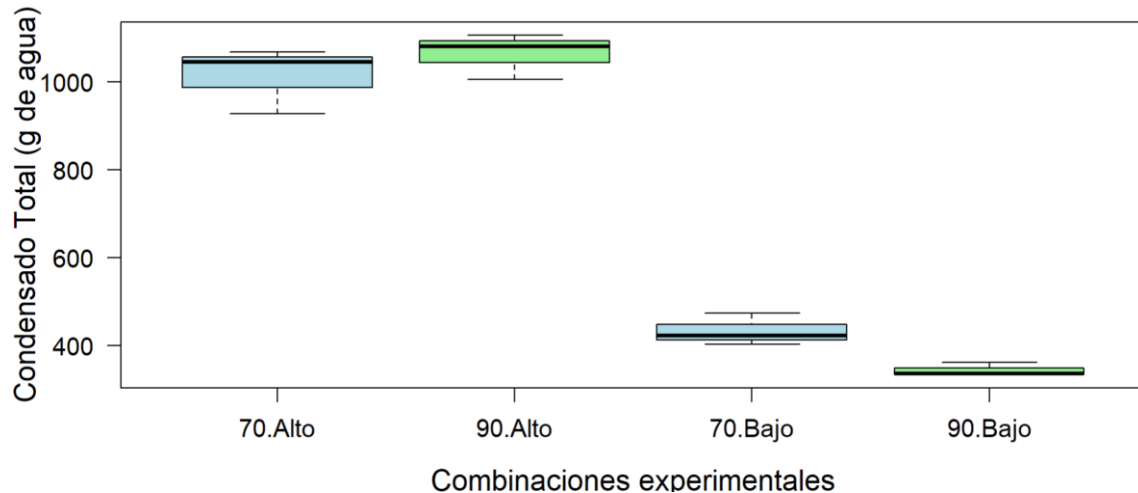
Diagrama de interacción de los resultados obtenidos



Nota. se realizó en el entorno y lenguaje de programación R.

Figura 35

Diagrama de cajas y bigotes de los resultados obtenidos



Nota. se realizó en el entorno y lenguaje de programación R.

El gráfico de interacción de la Figura 34 muestra cómo la interacción entre los factores afecta el condensado total. En primer lugar, se observa que la medida de agua condensada es claramente mayor cuando el suministro de energía es alto, en comparación con cuando es bajo. Además, cuando el suministro energético es alto, se identifica una leve variación en el total del condensado cuando se tiene una temperatura de entrada de 70 o de 90°C. Sin embargo, la diferencia es mucho más pronunciada a un suministro energético bajo. Por lo tanto, el comportamiento de los condensados totales con los cambios de temperatura es diferente entre los niveles de suministro energético. Esto sugiere que sí hay una interacción entre los factores, en la cual la temperatura de ingreso del POME afecta en cierta medida el impacto del suministro energético sobre la tasa de condensado. Adicionalmente, se observa que las líneas del diagrama no son paralelas, lo cual respalda la interacción entre los dos factores (Montgomery & Runger, 2014).

El diagrama de cajas y bigotes presentado en la Figura 35 es un apoyo para visualizar la distribución de los datos en cada bloque. Cada caja representa un grupo de experimentos. En todos

los bloques se presenta una variabilidad baja, siendo el de 90°C de ingreso de POME con bajo suministro energético el de menor dispersión de datos. No se observó ningún valor atípico, entonces se puede asumir que no hay observaciones extremas que puedan influir desproporcionadamente en los resultados del análisis. Siguiendo la misma tendencia de la Figura 34, la cantidad de condensado cambia con el suministro energético (alto o bajo) y se evidencia la interacción de factores, puesto que la variación en la cantidad de condensado no es uniforme, esta cambia por el efecto de la temperatura de ingreso del POME sobre el suministro energético.

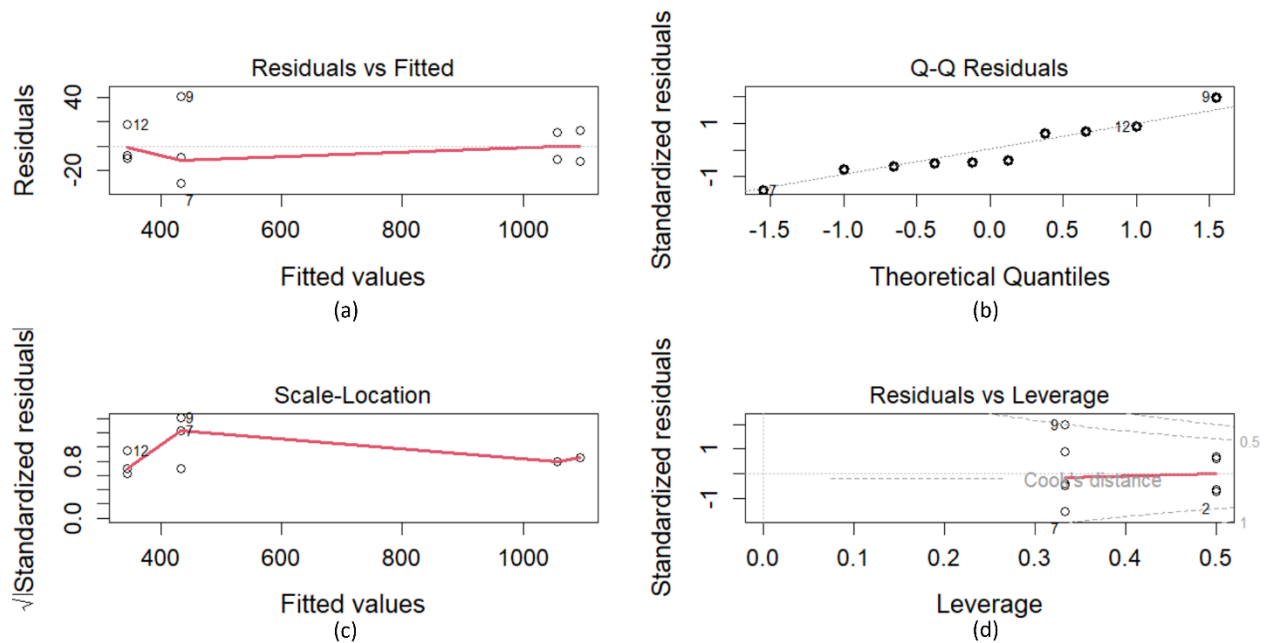
4.2.3. Comprobación de las hipótesis de ANOVA

Se llevó a cabo la construcción y comprobación de hipótesis de 3 modelos predictivos. El primero considerando las 12 observaciones de las pruebas experimentales. El segundo descartando la muestra de la prueba P3T70H (ver Tabla 8), y el tercero descartando adicionalmente la muestra de la prueba P1T90H. Se considera que el último modelo es el que mejor se ajusta a los resultados experimentales, y en esta sección se presenta su comprobación de hipótesis. El procedimiento aplicado sobre los otros 2 modelos se presenta en el anexo C.

La Figura 36 presenta los gráficos considerados para el análisis de residuos del modelo predictivo de regresión lineal. Este análisis ayuda a verificar que se cumplan los supuestos que le dan validez al ajuste del modelo sobre los resultados experimentales.

Figura 36

Gráficos de residuos del modelo predictivo



Nota. (a) Gráfico de residuos vs valores ajustados. (b) Gráfico cuantil-cuantil (Q-Q) de los residuos. (c) Gráfico escala-localización. (d) Gráfico de residuos vs apalancamiento.

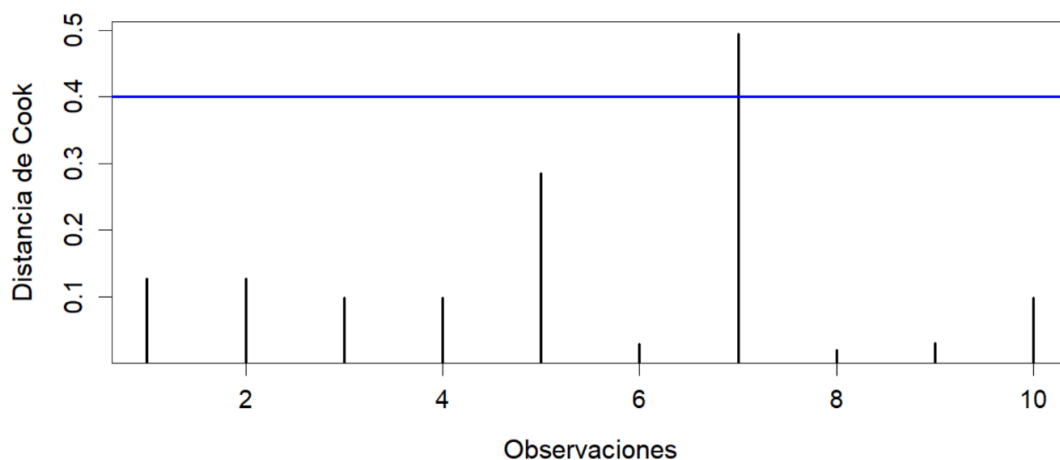
La Figura 36-a presenta una distribución relativamente uniforme de los residuos alrededor de la línea horizontal de 0, lo cual indica tendencia a la dependencia lineal entre las variables. Además, su línea de suavizado presenta una pendiente poco pronunciada. Esto permite seguir asumiendo homocedasticidad en el modelo. Se resalta que tampoco hay un patrón claro entre los residuos, por lo que los datos siguen siendo independientes. La Figura 36-b presenta una mínima desviación con el punto 9 (Prueba P3T70L), pero en general, los datos muestran una tendencia lineal acorde a la línea de normalidad, por lo que se asume que se cumple el supuesto de distribución normal. La Figura 36-c presenta residuos uniformemente distribuidos alrededor de la línea de suavizado, la cual cuenta con cierta tendencia horizontal con pendientes poco pronunciadas. Por lo tanto, se asume la homocedasticidad de este modelo de regresión. Finalmente, la Figura 36-d presenta las observaciones o residuos dentro de las líneas de Cook proyectadas en

el diagrama. Además, su línea de suavizado esta casi alineada con la línea horizontal de 0. Esto indica que no debería haber presencia de puntos de influencia problemáticos para el ajuste del modelo.

El análisis de residuos se complementó con el de la distancia de Cook (ver Figura 37). Según el umbral discutido en la metodología (sección 3.2.6), hay una observación que aún se encuentra por encima del rango aceptable de valores de distancia de Cook. Sin embargo, se considera que retirar más datos del análisis puede ser contraproducente para el mismo. Además, teniendo en cuenta los resultados de la Figura 36-d, se asume que no hay más puntos con influencia significativa que deban ser descartados de los datos de ajuste del modelo.

Figura 37

Distancia de Cook de los datos experimentales del modelo predictivo



4.3. Construcción de un modelo predictivo

Teniendo en cuenta los resultados de la sección 4.2.3, se consideran los coeficientes y parámetros del modelo predictivo de regresión lineal como se presenta en la Tabla 12.

Tabla 12

Modelo de regresión lineal modificado, descartando dos medidas que pueden ser influyentes

Residuals				
Min	1Q	Median	3Q	Max
-30,667	-10.75	-8.833	12.125	40.333
Coefficients				
	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
Intercept	432.67	14.34	30.165	8.81E-08
Temperatura90	-88.67	20.28	-4.371	0.00471
Energia12.35	624.33	22.68	27.529	1.52E-07
Temperatura90: Energia12.35	125.17	32.07	3.903	0.00796
Más parámetros				
RSE	R²	Adjusted R²	F-statistic	P-value
24.84	0.9968	0.9952	618.7	7.309E-08
6 DF			3 and 6 DF	

Nota. se realizó en el entorno y lenguaje de programación R.

Con base en el Error Residual Estándar (RSE), se observa que las predicciones de este modelo distan a 24.84 gramos de condensado en promedio de los resultados experimentales. Adicionalmente, según el coeficiente de determinación ajustado (Adjusted R²), el modelo puede explicar el 99.52% de la variabilidad presentada en la tasa de condensado. De acuerdo con su P-valor, se trata de un modelo estadísticamente significativo. Este modelo presenta el error estándar residual y P valor más bajos, junto con el coeficiente de determinación ajustado más alto. En consecuencia, este es el modelo que mejor se ajusta a los datos experimentales. Los otros modelos que fueron tenidos en cuenta se presentan en el anexo B.

Este modelo cuenta con un coeficiente de intercepto de 432.67, el cual corresponde a la media de las muestras de condensado P1T70L, P2T70L y P3T70L (ver Tabla 8), que pertenecen a la combinación experimental de 70°C de entrada de POME con bajo suministro energético. Este coeficiente se debe a un componente de aleatoriedad correspondiente a las funciones del entorno R. Asimismo, el ajuste del modelo asignó un coeficiente del factor de suministro energético de 624.33, un coeficiente de interacción de 125.17 y un coeficiente de temperatura de ingreso de

POME de -88.67. Debido a su P-valor (<0.05) estos coeficientes se consideran estadísticamente significativos dentro del modelo.

En conclusión, este último modelo de regresión lineal cumple con las suposiciones de linealidad, distribución normal y homocedasticidad, y carece de puntos de alta influencia que pueden alterar los resultados. Además, presenta un buen ajuste a los resultados experimentales.

Por lo tanto, el modelo predictivo de regresión lineal resultante de este ANOVA esta dado por la Ecuación 19.

Ecuación 19

Modelo completo de regresión lineal

$$\begin{aligned} \text{Condensado}_{(g)} = & 432.67 - 88.67 * \text{Temp}_{(^\circ C)} + 624.33 * \text{Energía}_{(kWh)} \\ & + 125.17 * \text{Temp}_{(^\circ C)} * \text{Energía}_{(kWh)} \end{aligned}$$

La tasa de condensado ($\text{Condensado}_{(g)}$) está en función de la temperatura de entrada del POME ($\text{Temp}_{(^\circ C)}$) y el suministro de energía ($\text{Energía}_{(kWh)}$). El factor temperatura de entrada del POME asume un valor de 1 para 90°C y 0 para 70°C . El factor suministro de energía asume un valor de 1 para 12.35 kWh (alto suministro) y 0 para 7.02 kWh (bajo suministro).

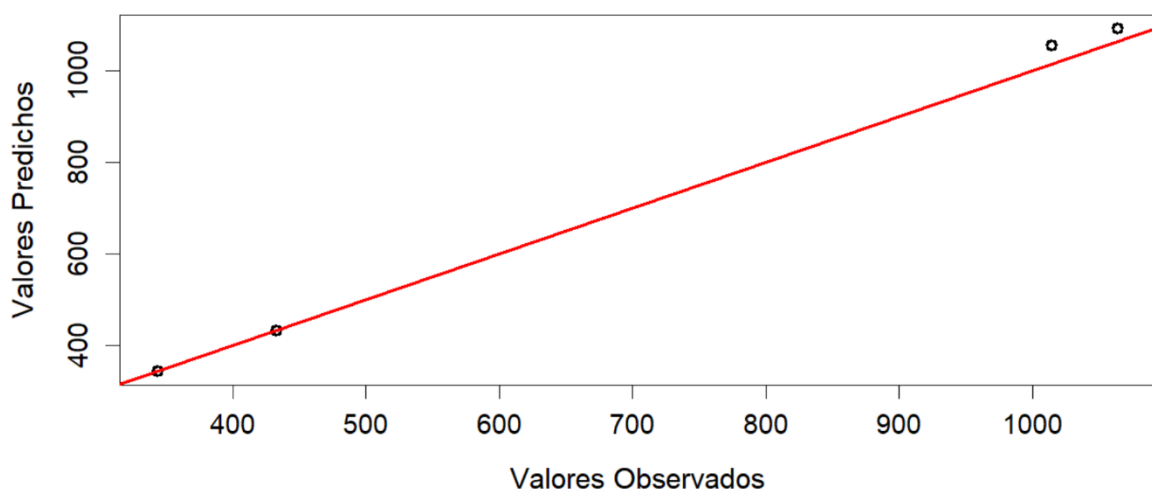
Todos los datos experimentales disponibles son los presentados en la Tabla 8, bajo los bloques de 90 y 70°C a alto y bajo suministro energético. El modelo de la Ecuación 19 fue puesto a prueba, y el contraste con los datos experimentales se observa en la Figura 38. Se calculó un error absoluto medio de 18.208 gramos de condensado y una raíz del error cuadrático medio de 26.074 gramos de condensado. Estos parámetros representan una desviación de menos del 10% respecto a los resultados experimentales, lo cual sugiere que el modelo cuenta con un buen ajuste a dichos resultados.

La Figura 39 presenta el intervalo de confianza del modelo predictivo y concuerda con el ajuste que tuvo con los datos experimentales. Puesto que los resultados se encuentran dentro del rango del intervalo de confianza del 95% (líneas azules punteadas). Esto indica que el modelo de predicción es confiable y se ajusta adecuadamente a la respuesta promedio de las variables conocidas. Adicionalmente, se presenta el intervalo de predicción en la Figura 40. Las respuestas del modelo también se encuentran dentro de este intervalo. Por lo tanto, es probable que el modelo predictivo se ajuste adecuadamente a la respuesta de nuevas configuraciones de temperatura de entrada de POME y suministro energético.

Es importante aclarar que el modelo predictivo de correlación lineal solo se encuentra verificado por los resultados experimentales. Es decir, el intervalo de predicción indica que el modelo es confiable para llevar a cabo predicciones de configuraciones entre 70 y 90°C de ingreso de POME a alto o bajo suministro energético. Pero no se cuenta con resultados que validen experimentalmente estas predicciones. Por lo tanto, la confiabilidad del modelo se encuentra delimitada por la información experimental disponible.

Figura 38

Diagrama de predicción del modelo vs datos experimentales



Nota. se realizó en el entorno y lenguaje de programación R.

Figura 39

Intervalo de confianza del modelo predictivo de regresión lineal

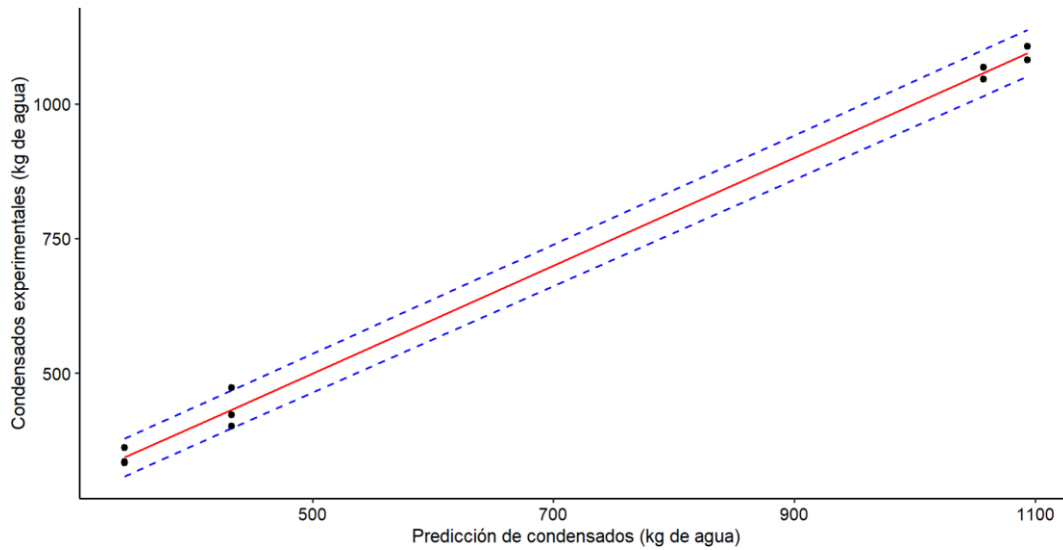
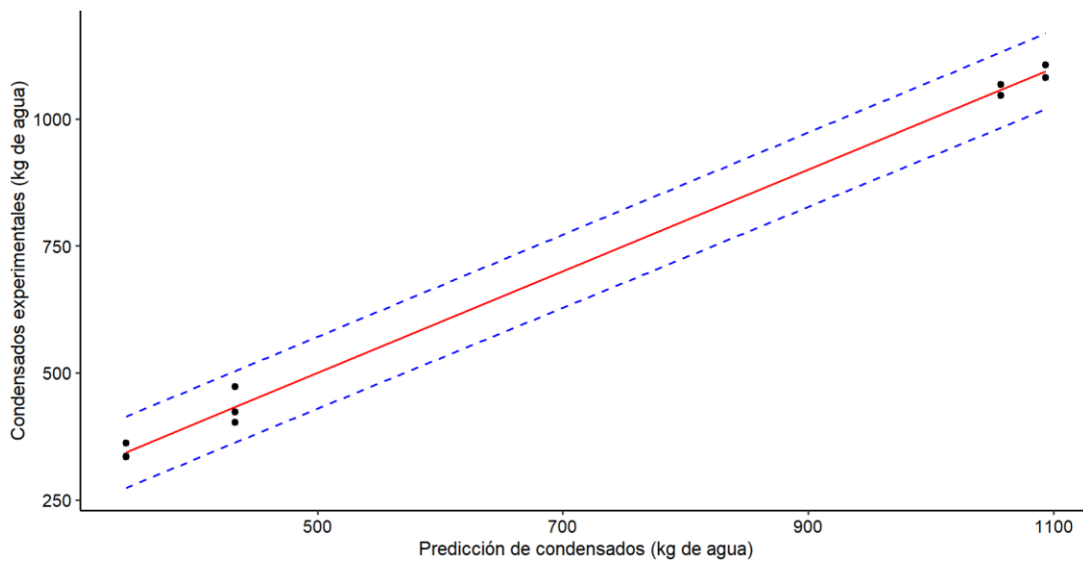


Figura 40

Intervalo de predicción del modelo predictivo de regresión lineal



4.4. Evaluación de desempeño del sistema

La Tabla 13 presenta los resultados más importantes del consumo de energía que se da en el calderín, el sistema de acondicionamiento de muestras y la torre de enfriamiento del banco experimental de evaporación al vacío. La obtención de estos valores se presenta en el anexo D.

Tabla 13

Resultados del consumo de energía del sistema

Parámetro	Valor	Unidades
Energía total aprovechada del calderín ($Q_{Aprovechada}$)	12.35	kWh
Pérdidas por gases de combustión ($q_{chimenea}$)	13.8	%
Pérdidas a través de las paredes del calderín ($Q_{paredes}$)	6.38	%
Consumo del sistema de acondicionamiento de muestras	0.43	kWh
Consumo de la torre de enfriamiento	1.32	kWh
Consumo de la Bomba de vacío	0.92	kWh
Energía total consumida por el sistema de evaporación al vacío	15.02	kWh

Los rendimientos calculados para las 2 situaciones planteadas en la metodología se presentan en la Tabla 14. Solo se tuvieron en cuenta resultados de condensados que recibían el suministro energético más alto del calderín.

Tabla 14

Rendimiento del sistema de evaporación al vacío

Condensado total (L_{pome})	Rendimiento con todos los sistemas (L_{pome}/kWh)	Rendimiento sin sistemas de calentamiento (L_{pome}/kWh)
1.006	0.100	0.674
1.081	0.108	0.724
1.106	0.110	0.741
1.068	0.107	0.715
1.046	0.104	0.700
0.928	0.093	0.621

El banco de evaporación al vacío en su modalidad de simple efecto teniendo en cuenta todos los sistemas indicados (calderín, sistema de acondicionamiento de muestras, bomba de vacío y torre de enfriamiento) es capaz de tratar un promedio de 0.106 ± 0.006 litros de POME por cada *kWh* de energía consumida. Por otro lado, si solo se considera el consumo energético de la torre de enfriamiento y la bomba de vacío, el sistema puede tratar un promedio de 0.696 ± 0.043 litros de POME por cada *kWh* de energía consumida.

Si ya se cuenta con un suministro energético, el rendimiento del sistema incrementa hasta 6.7 veces. La disponibilidad de energía térmica en una planta de extracción de aceite de palma se podría obtener mediante el aprovechamiento de la energía térmica residual del proceso, que en este experimento fue simulada por el vapor producido en el calderín en el banco de pruebas.

En el trabajo de Gómez (2021), el sistema alcanza un rendimiento de 0.85 litros de agua residual procesada por kWh consumido teniendo en cuenta la torre de enfriamiento y la bomba de vacío solamente. Esto indica que, con las modificaciones, el rendimiento del sistema disminuyó. Lo cual se atribuye a que los cambios aplicados sobre el banco de laboratorio implican un mayor consumo energético respecto a su estado inicial. Especialmente el consumo de la torre de enfriamiento, el cual aumenta aproximadamente 4 veces respecto al montaje que tenía al principio debido al cambio de la bomba.

4.5. Resultados del modelo térmico teórico

La Tabla 15 y la Tabla 16 presentan los resultados más destacados del evaporador de calandria y del condensador respectivamente. La Figura 41 y Figura 42 presentan los volúmenes de control considerados y sirven como apoyo para visualizar estos resultados dentro del sistema. Los parámetros relacionados con las dimensiones del sistema, y en consecuencia el área de transferencia de calor, provienen del trabajo de Gómez (2021).

Los resultados de transferencia de calor se mantienen acordes con la conservación de la energía del sistema estacionario que se observó en la sección 4.1.2. Sin embargo, fue necesario manipular la temperatura de exceso en el modelo del evaporador para que se diera la equivalencia. Se considera que el proceso de evaporación no se da en el régimen de ebullición nucleada como se asumió en un principio. Puesto que fue necesario acudir a una temperatura de exceso más baja (<5). Esto indica que la evaporación se da en un régimen de convección natural, lo cual implica un flujo de calor más bajo que si fuera ebullición nucleada. Del mismo modo, si la transferencia de calor es baja en el evaporador, se considera igual para el condensador.

Tabla 15

Resultados destacados del modelo térmico del evaporador del sistema

Coefficiente	Valor	Unidades
Calor transferido (Q)	6.450	kW
Coefficiente global de transferencia de calor (U)	0.242	$kW/m^2 * K$
Flujo de calor en ebullición nucleada ($q_{nucleada}$)	1.225	kW/m^2
Coefficiente de convección dentro de los tubos ($h_{interna}$)	0.318	$kW/m^2 * K$
Coefficiente de convección fuera de los tubos ($h_{externa}$)	6.044	$kW/m^2 * K$

Figura 41

Volumen de control y visualización de resultados del evaporador del sistema

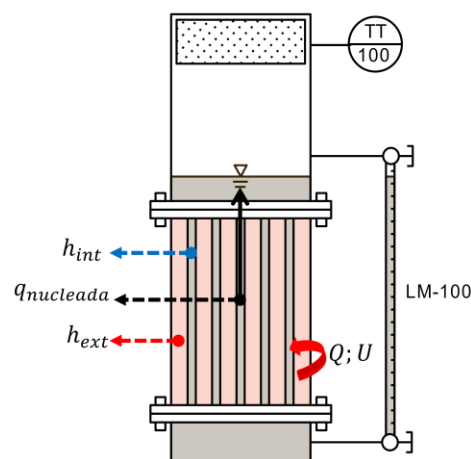


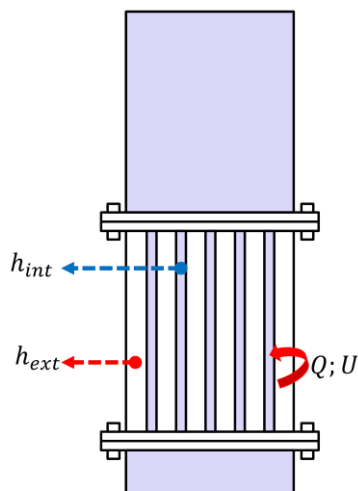
Tabla 16

Resultados destacados del modelo térmico del condensador del sistema

Coefficiente	Valor	Unidades
Calor transferido (Q)	6.478	kW
Coefficiente global de transferencia de calor (U)	0.463	$kW/m^2 * K$
Coefficiente de convección dentro de los tubos ($h_{interna}$)	0.651	$kW/m^2 * K$
Coefficiente de convección fuera de los tubos ($h_{externa}$)	6.227	$kW/m^2 * K$
Número de Reynolds	3128	-

Figura 42

Volumen de control y visualización de resultados del condensador del sistema



En general, los dos intercambiadores de calor presentan transferencias de calor deficientes. El evaporador de calandria presenta un coeficiente global de transferencia de calor de $0.242 \text{ kW}/\text{m}^2 * \text{K}$. Es decir, es capaz de transferir 242 W de calor por cada metro cuadrado de superficie de intercambio de calor por cada grado Kelvin de diferencia entre los fluidos. De forma similar, el condensador presenta un coeficiente global de transferencia de calor de $0.463 \text{ kW}/\text{m}^2 * \text{K}$.

Se pueden alcanzar conclusiones similares observando los coeficientes de transferencia de calor por convección. Dentro de los tubos del condensador y el evaporador, los coeficientes de

transferencia de calor por convección son muy bajos, indicando una mayor resistencia térmica. Sin embargo, se resalta que, por fuera de los tubos de ambos sistemas, la transferencia de calor por convección en la condensación presenta coeficientes más altos, indicando una transferencia de calor más alta por fuera de los tubos.

A pesar de las mejoras realizadas en la torre de enfriamiento, se obtuvo un flujo en transición con mayor tendencia a flujo laminar (se aproximó a flujo laminar en región de entrada). Esto respalda la transferencia de calor deficiente en el condensador, puesto que la transferencia de calor es más alta con flujos turbulentos. Del mismo modo, se considera que el intercambiador de calor también limita la transferencia de calor, debido a que es necesaria una mayor área de transferencia e incluso un diseño o distribución del sistema más adecuado, ya que los condensadores suelen estar en una configuración horizontal, en vez de vertical como en el banco del laboratorio.

La transferencia de calor en el evaporador también se puede incrementar mediante el aumento del flujo de vapor y del área de transferencia de calor. El flujo de calor en el régimen de ebullición nucleada es superior al del régimen de convección natural, por lo cual se recomienda diseñar o adecuar el intercambiador de calor de forma que pueda permanecer en los parámetros de ebullición nucleada.

4.6. Análisis fisicoquímicos de las muestras de POME

Los resultados de los análisis fisicoquímicos desarrollados en el laboratorio ECOSAM S.A.S son presentados en la Tabla 17.

Tabla 17

Resultados de análisis fisicoquímicos

Propiedad	POME	Lodos concentrados	Destilados	Límite Res. 0631 de 2015
DBO ₅	15349 mg/L	15477 mg/L	229 mg/L	1500 mg/L O ₂
DQO	71998 mg/L O ₂	70195 mg/L O ₂	485 mg/L O ₂	600 mg/L O ₂
Cl	1702 mg/L Cl	3240 mg/L Cl	<3 mg/L Cl	500 mg/L Cl

Nota. Datos proporcionados por PHINA BIOSOLUCIONES S.A.S

En primer lugar, se observa que al extraer POME sin tratamiento alguno, este supera los límites establecidos en la resolución 0631 del 2015. Por otro lado, los destilados sí cumplen con los parámetros establecidos, puesto que las propiedades analizadas se encuentran por debajo de lo establecido por la norma. Por lo tanto, las cargas contaminantes de estos destilados (POME tratado) disminuyen y pueden ser aprovechados como agua en el proceso de extracción.

Las cargas contaminantes ciertamente siguen siendo altas en los lodos concentrados, pero hay que tener en cuenta que, al estar más concentrados, ocupan menos volumen que el POME inicial, y si se trata de concentrados sólidos, es más fácil disponer de ellos. Además, otros trabajos de investigación han demostrado que los concentrados sólidos son ricos en nutrientes de plantas, por lo que pueden ser utilizados en la producción de fertilizantes o de alimentos para animales (Ngan, 2000). La concentración de dichos nutrientes en los lodos concentrados no forma parte del alcance de este proyecto.

Los resultados de estos análisis presentan un beneficio de aplicar la evaporación al vacío en el tratamiento de POME, puesto que hace que el efluente alcance los parámetros indicados por la norma para su disposición. Además, elimina la necesidad de desechar o eliminar estos efluentes, puesto que sus subproductos pueden ser aprovechados en el proceso o como materia prima para la fabricación de otros productos.

5. Conclusiones

El desarrollo de este proyecto de grado permitió obtener resultados teóricos y experimentales del rendimiento del proceso de evaporación al vacío de muestras de efluente de palma POME. A continuación, se destacan algunos de los aspectos más relevantes de este proyecto.

Para llevar a cabo la experimentación fue necesario realizar adecuaciones y mejoras sobre el banco de laboratorio de evaporación al vacío de múltiple efecto que incluyen: la adición de un sistema de alimentación y precalentamiento controlado (acondicionamiento de muestras), la instalación de un eliminador de aerosoles (rompegotas), instrumentación para la medición de presión y temperatura, el cambio de la bomba y conexiones de la torre de enfriamiento.

Los resultados de las diferentes pruebas mostraron que el tiempo promedio en alcanzar el periodo pseudoestacionario fue de 28 ± 8 minutos. A partir de este momento, el comportamiento del sistema se mantuvo en el tiempo. De manera general, se destaca que los parámetros de presión, temperatura y tasa de condensado en el sistema se mantuvieron uniformes durante la mayor parte de cada prueba. Además, las temperaturas medidas en diferentes puntos del sistema no variaron significativamente ($< 5\%$). Adicionalmente, se resalta la condición de sistema estacionario que se presentó en el banco de pruebas, puesto que la masa de condensados de POME procesado a la salida del sistema es muy similar a la masa de vapor del calderín condensado.

Los resultados de los modelos térmicos del proceso sugieren bajas tasas de transferencia de calor en los intercambiadores (evaporador y condensador) del sistema, especialmente en las áreas internas de los tubos, donde se presentaron las mayores resistencias térmicas. Estos resultados permiten inferir que se necesita una mayor área de transferencia de calor en los

intercambiadores (junto con un diseño más adecuado) o un mayor flujo de los fluidos de calentamiento y enfriamiento para obtener un sistema de evaporación más eficiente.

Fue necesario modificar la torre de enfriamiento de manera que pudiera suministrar un flujo mayor en beneficio de la tasa de condensado del sistema, puesto que antes era demasiado bajo (7 L/min). Con las modificaciones de bomba y conexiones, este flujo aumentó a 63 L/min. Sin embargo, los resultados indican que la transferencia de calor hacia el fluido de la torre es muy baja debido en parte a que hace falta mayor turbulencia o velocidad en el flujo, lo cual se refleja con un número de Reynolds de 3128. Adicionalmente, en la etapa experimental se observó que el diseño de la torre de enfriamiento somete el flujo a muchos cambios de sección. A pesar de las modificaciones, este factor puede seguir afectando el desempeño de la torre de enfriamiento.

Se llevaron a cabo 12 pruebas experimentales siguiendo los parámetros indicados en el diseño de experimentos de 2 factores por 2 niveles elaborado para el desarrollo de este proyecto. Las muestras de los resultados fueron sometidas a un análisis de varianza que determinó que los factores más influyentes sobre la tasa de condensados proveniente del proceso de evaporación al vacío son la tasa de suministro energético y su interacción con el factor de temperatura de ingreso de POME al sistema. Este último indica que la magnitud de influencia de la tasa de suministro energético sobre el proceso se ve afectada por la temperatura de ingreso del efluente. Sin embargo, el factor de temperatura de ingreso de POME por sí mismo no es determinante en la tasa de condensados del proceso de evaporación al vacío en el banco experimental. Se observó que las mayores tasas de condensado se presentan especialmente bajo el mayor suministro energético. Adicionalmente, se llevaron a cabo análisis de residuos que soportan el buen ajuste de los resultados del análisis a los datos experimentales.

El análisis estadístico de los resultados también permitió identificar una relación de linealidad entre los factores (variables independientes) y la tasa de condensado (variable dependiente) del proceso de evaporación al vacío. De esta manera, se elaboró un modelo predictivo de correlación lineal que permite predecir la tasa de condensado bajo condiciones de temperatura de ingreso de POME y tasa de suministro de energía diferentes a las de los datos experimentales. Se verificó por medio de diferentes indicadores y herramientas que los resultados del modelo se ajustan adecuadamente a los datos experimentales y que es probable que los resultados predichos en otras configuraciones sean cercanos a los que indica el modelo predictivo. Sin embargo, no se cuenta con una validación experimental de configuraciones diferentes de los factores.

Los resultados mostraron que el banco de pruebas es capaz de procesar 0.106 ± 0.006 litros de POME por cada *kWh* de energía consumida. Este rendimiento puede aumentar 6.7 veces si ya se cuenta con un sistema de suministro energético para llevar a cabo el proceso de evaporación. Estos rendimientos son datos que soportan una posible viabilidad de estos sistemas en plantas de extracción de aceite de palma, una vez que estas cuentan con energía térmica residual que puede ser utilizada para suplir o apoyar el suministro energético del sistema.

La implementación de un sistema de evaporación al vacío en la industria del aceite de palma podría generar un impacto positivo. En primer lugar, requiere de mucho menos espacio de trabajo que las lagunas implementadas actualmente. En el ámbito ambiental, reduce considerablemente las cargas contaminantes del POME y elimina la necesidad de verter el efluente, puesto que sus productos derivados pueden ser reutilizados en otros procesos de la planta de extracción (condensados) y para la producción de fertilizantes (lodos concentrados). El consumo energético del sistema es un factor significativo, pero se puede suplir parcial o completamente mediante la canalización de vapor residual, la quema de residuos de fibra y

cascarilla en las calderas para generar vapor, la quema de biomasa para generar energía eléctrica, entre otras alternativas.

Los análisis fisicoquímicos demuestran la capacidad del proceso de evaporación al vacío para reducir las cargas contaminantes del POME y cumplir con los parámetros establecidos por la resolución 0631 del 2015. Esto también indica una posible viabilidad de aplicación de estos sistemas en el tratamiento de POME, por lo cual se puede considerar el desarrollo de prototipos de mayor escala para evaluar el desempeño y viabilidad de estos sistemas a nivel industrial. Los resultados de los análisis fisicoquímicos también resaltan la reproducibilidad de los experimentos en el banco del sistema de evaporación al vacío. Puesto que no se aplicaron cambios en la metodología de las pruebas experimentales para recolectar las muestras que se enviaron al laboratorio.

6. Recomendaciones

El aumento en la eficiencia de transferencia de calor del sistema depende de los flujos de los fluidos de calentamiento y enfriamiento. Se requiere de un sistema de suministro energético (generación de vapor) capaz de proporcionar un mayor flujo másico de vapor que el actual para incrementar la transferencia de calor hacia el interior de los tubos del evaporador. Del mismo modo, se recomienda actualizar el sistema de aspersion de la torre de enfriamiento por completo, ya que este no permite el mejor funcionamiento de la torre de enfriamiento. La configuración del condensador también puede ser optimizada, cambiándola a una configuración de funcionamiento horizontal. Adicionalmente, se recomienda realizar la inversión para realizar un cambio de diseño

de los intercambiadores de calor por completo, puesto que se requiere un área de transferencia de calor más grande y un diseño más adecuado para mejorar su transferencia de calor.

Se recomienda para futuras investigaciones llevar a cabo un análisis de varianza identificando más factores (como el efecto de un flujo continuo de POME, por ejemplo). Este proceso implica metodologías experimentales y métodos de análisis más complejos, pero puede resultar en modelos predictivos más exactos y un estudio más detallado de la influencia de las variables.

Referencias bibliográficas

- A Aziz, M. M., Kassim, K. A., ElSergany, M., Anuar, S., Jorat, M. E., Yaacob, H., Ahsan, A., Imteaz, M. A., & Arifuzzaman. (2020). Recent advances on palm oil mill effluent (POME) pretreatment and anaerobic reactor for sustainable biogas production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 119. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109603>
- Al-Amshawee, S. K., Yunus, M. Y., & Azoddein, A. A. (2020). A Review Study of Biofilm Bacteria and Microalgae Bioremediation for Palm Oil Mill Effluent: Possible Approach. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 736(2). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/736/2/022034>
- Althausen, M. (2016). Tratamiento de Efluentes de la Planta de Beneficio-Convertir un residuo en un recurso. *Revista Palmas*, 37, 31–37.
- Castells, X. E. (2012). *TECNOLOGÍAS APLICABLES AL TRATAMIENTO DE RESIDUOS*. Díaz de Santos. <https://books.google.com.ec/books?id=RCPazhK7BkcC&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false>
- Cengel, Y., & Ghajar, A. (2011). *Transferencia de calor y masa* (4a ed.). McGrawHill.
- C&G IBERICA. (2018, enero 17). *La evaporación al vacío, una tecnología para la reducción de residuos y reutilización del agua*. [https://www.iagua.es/noticias/cg-iberica/evaporacion-al-vacio-tecnologia-reduccion-residuos-y-reutilizacion-agua#:~:text=La%20evaporaci%C3%B3n%20al%20vac%C3%ADo%20es,\(5%25%20de%20agua](https://www.iagua.es/noticias/cg-iberica/evaporacion-al-vacio-tecnologia-reduccion-residuos-y-reutilizacion-agua#:~:text=La%20evaporaci%C3%B3n%20al%20vac%C3%ADo%20es,(5%25%20de%20agua)

- Chaparro, D. C. (2023, septiembre 5). Oportunidades y retos para el sector palmero colombiano en la descarbonización de la economía. *El Palmicultor*.
<https://elpalmicultor.fedepalma.org/oportunidades-retos-sector-palmero-descarbonizacion-economia/>
- Condorchem Envitech. (2023). *Evaporadores al vacío industriales*.
<https://condorchem.com/es/evaporadores-al-vacio/>
- FEDEPALMA. (2015). *Rutas tecnológicas para el manejo integral de aguas residuales en las plantas de beneficio del sector palmero* (Y. Moreno, E. Mantilla, & X. Diaz, Eds.). Fedepalma-Fondo de Fomento Palmero.
- fedepalma. (2023). *LA PALMA DE ACEITE EN COLOMBIA*. <https://fedepalma.org/zonas-palmeras/zona-norte/>
- Ismail, S., Idris, I., Ng, Y. T., & Ahmad, A. L. (2014). Coagulation of Palm Oil Mill Effluent (POME) at High Temperature. *Journal of Applied Sciences*, *14*, 1351–1354.
<https://doi.org/10.3923/jas.2014.1351.1354>
- Khadaroo, S. N. B. A., Poh, P. E., Gouwanda, D., & Grassia, P. (2019). Applicability of various pretreatment techniques to enhance the anaerobic digestion of Palm oil Mill effluent (POME): A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *7*(5).
<https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103310>
- Lokman, N. A., Ithnin, A. M., Yahya, W. J., & Yuzir, M. A. (2021). A brief review on biochemical oxygen demand (BOD) treatment methods for palm oil mill effluents (POME). En *Environmental Technology and Innovation* (Vol. 21). Elsevier B.V.
<https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101258>

- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS). (2015). *Resolucion 0631*. MINAMBIENTE.
- Mohammad, S., Baidurah, S., Kobayashi, T., Ismail, N., & Leh, C. P. (2021). Palm oil mill effluent treatment processes—A review. *Processes*, 9(5). <https://doi.org/10.3390/pr9050739>
- Montgomery, D., Peck, E., & Vining, G. (2006). *Introducción al Análisis de Regresión Lineal* (3a ed.). Editorial Continental.
- Montgomery, D., & Runger, G. (2014). *Applied Statistics and Probability for Engineers* (6a ed.). Wiley.
- Ngan, M. A. (2000). Innovaciones en el manejo del efluente de las plantas extractoras de aceite de palma. *PALMAS*, 21.
- Peña, O. C., & Lara, L. S. (2022). *Evaluación del tratamiento del efluente de la palma de aceite (POME) en el proceso de extracción en la planta Extractora Vizcaya S.A.S.* (tesis de pregrado). Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia
- Ponce, J. (2017, marzo 8). *3 Lineas Isoentalpicas* [Video recording]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=Y2ZMC0zz61I>
- Reinosa, D. C. (2009). Costos ambientales en el proceso de extracción del aceite de palma. Estudio de un caso. *Revista Venezolana de Gerencia*, 14(46), 228–247. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=29011523006>
- Salguero, J. S. (2017). *Reducción de la Demanda Bioquímica de Oxígeno de las muestras de agua de la cuenca baja del Río Chillón mediante micronanoburbujas de Aire y Ozono, distrito de Ventanilla – Callao 2017* (tesis de pregrado). Universidad Cesar Vallejo, Lima, Perú. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/3606>

- Vairappan, C. S., & Yen, A. M. (2008). Palm oil mill effluent (POME) cultured marine microalgae as supplementary diet for rotifer culture. *Journal of Applied Phycology*, 20(5), 603–608. <https://doi.org/10.1007/s10811-007-9305-1>
- Wicklin, R. (2019, junio 24). *Add loess smoothers to residual plots*. The DO Loop. <https://blogs.sas.com/content/iml/2019/06/24/loess-smoother-residual-plots.html>

Anexos

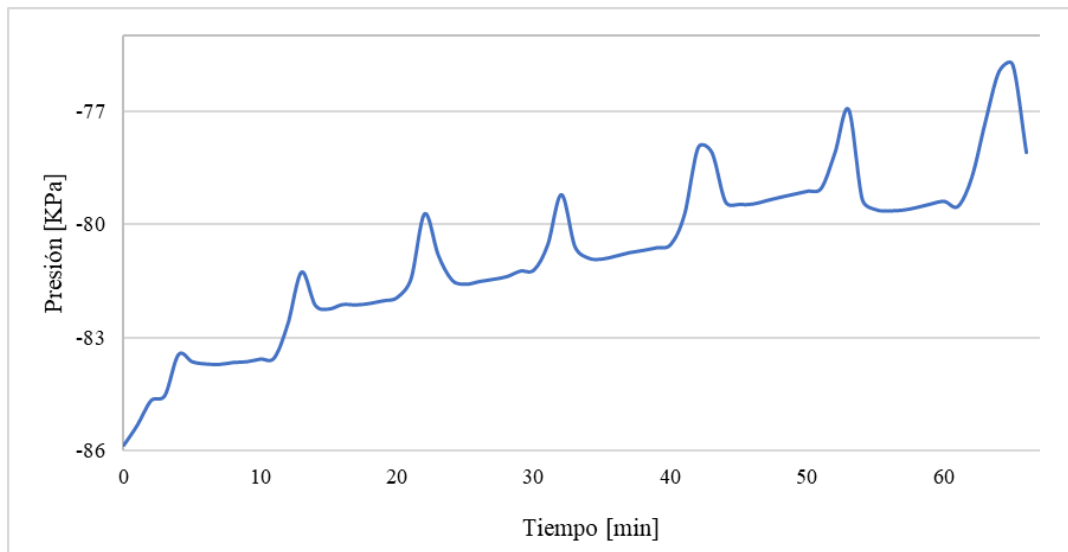
Anexo A. Resultados experimentales de las otras combinaciones experimentales

A continuación, se presentan los diagramas de presión, temperatura y condensados recolectados contra el tiempo resultantes de las pruebas de las combinaciones experimentales en adición a los presentados en la sección 4.1.2.

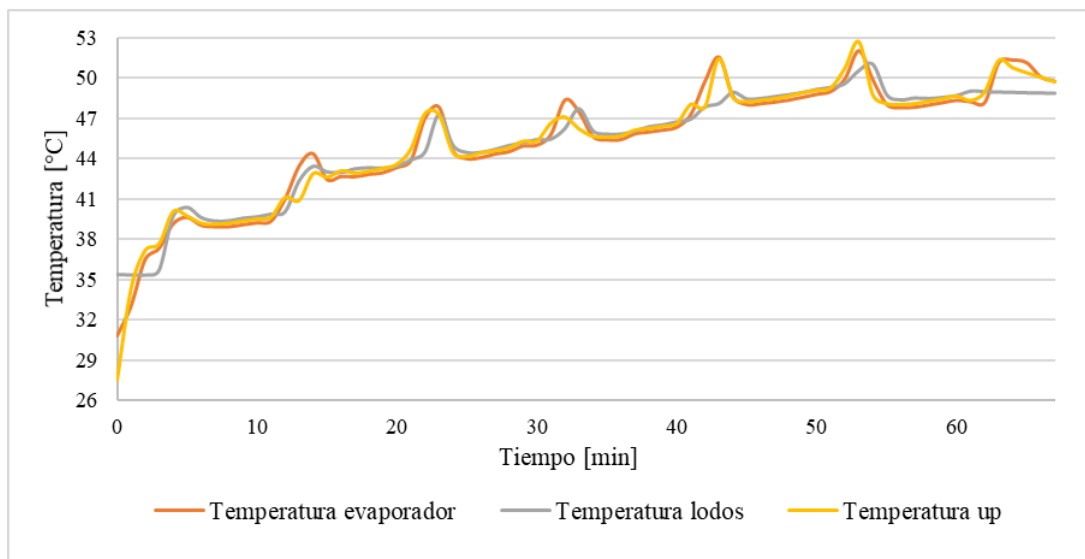
Desde la Figura 43 hasta la Figura 48 se presentan los resultados de las pruebas de la combinación experimental de 90°C de entrada de POME con un alto suministro energético. Esta prueba en particular tuvo que ser llevada a cabo durante 1 hora en primer lugar, y 2 horas posteriormente. En ambos casos, se identificó que al sistema le tomó alrededor de 40 minutos alcanzar un estado pseudoestacionario. Los comportamientos y observaciones de la presión, temperatura y condensados recolectados son iguales que los indicados en la sección 4.1.2. Entre ambas pruebas, se condensó un total de 4870 g de agua del condensador y 4693 g de agua del vapor del calderín en un tiempo total de 200 minutos.

Figura 43

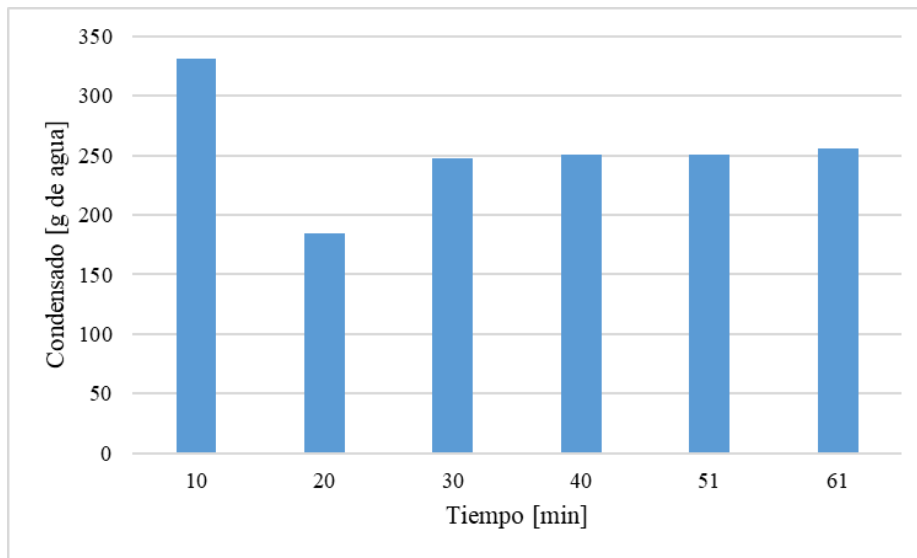
Comportamiento de la presión durante la primera parte de las pruebas con temperatura de suministro de POME de 90°C y alto consumo de energía

**Figura 44**

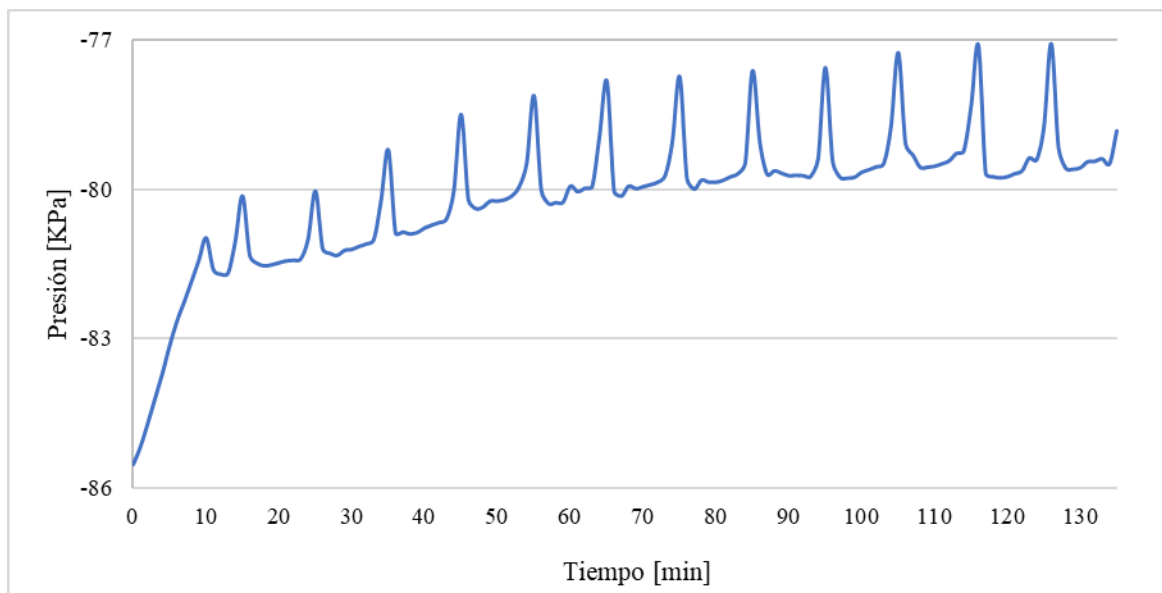
Comportamiento de la temperatura durante la primera parte de las pruebas con temperatura de suministro de POME de 90°C y alto consumo de energía

**Figura 45**

Comportamiento de la extracción de condensados del condensador durante la primera parte de las pruebas con temperatura de entrada de POME de 90°C y alto suministro de energía

**Figura 46**

Comportamiento de la presión durante la segunda parte de las pruebas con temperatura de suministro de POME de 90°C y alto consumo de energía

**Figura 47**

Comportamiento de la temperatura durante la segunda parte de las pruebas con temperatura de suministro de POME de 90°C y alto consumo de energía

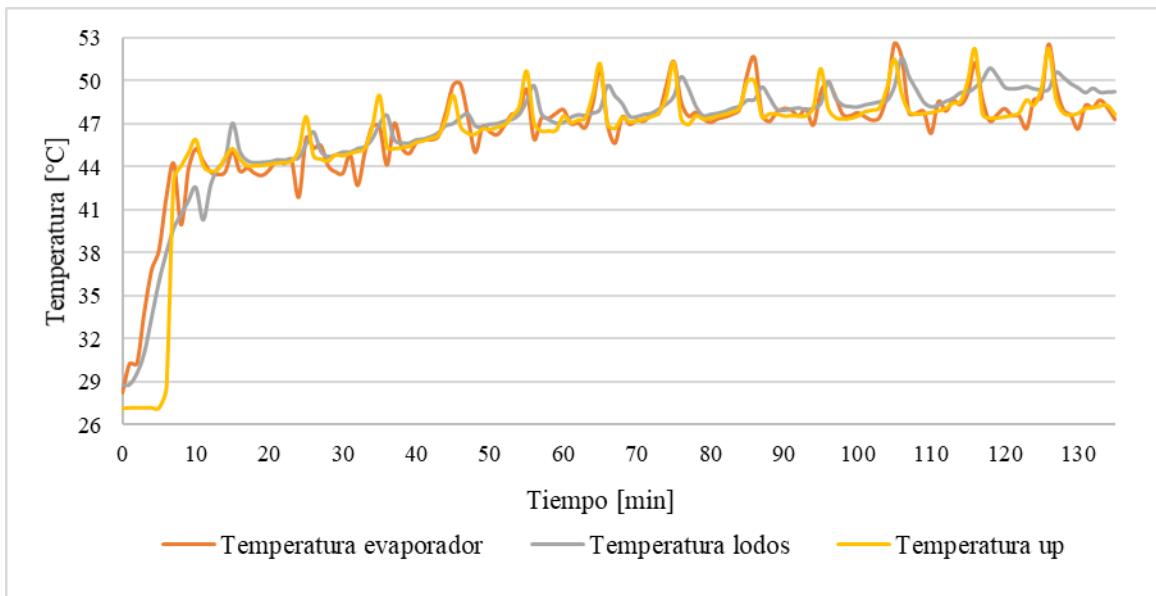
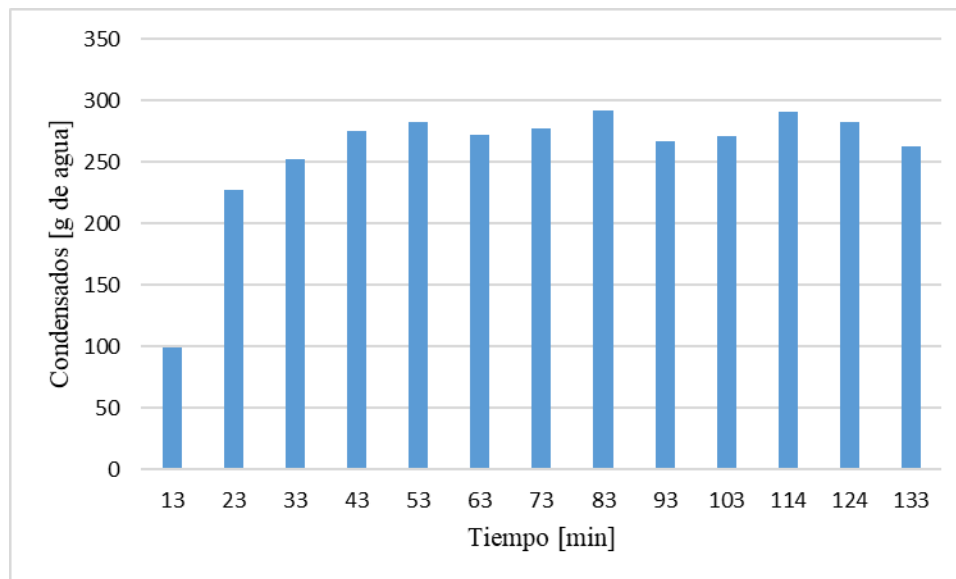


Figura 48

Comportamiento de la extracción de condensados del condensador durante la segunda parte de las pruebas con temperatura de entrada de POME de 90°C y alto suministro de energía



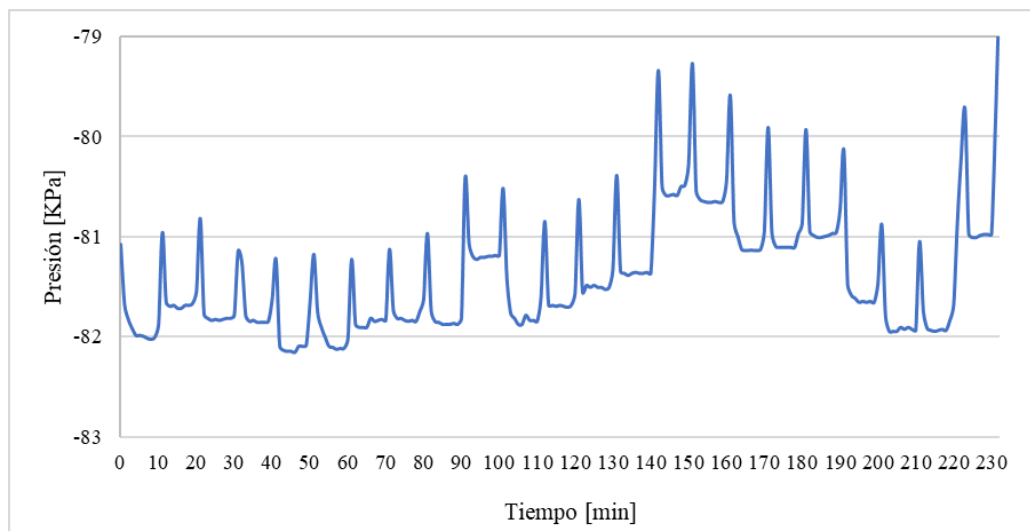
Desde la Figura 49 hasta la Figura 51 se presentan los resultados de las pruebas de la combinación experimental de 70°C de entrada de POME con un bajo suministro energético. Esta prueba permaneció estable durante casi todo su desarrollo, de modo que el sistema no tardó mucho

tiempo en alcanzar un periodo pseudoestacionario. Los comportamientos y observaciones de la presión, temperatura y condensados recolectados son iguales que los indicados en la sección 4.1.2. Se condensó un total de 2716 g de agua del condensador y 2781 g de agua del vapor del calderín en un tiempo total de 232 minutos.

Desde la Figura 52 hasta la Figura 54 se presentan los resultados de las pruebas de la combinación experimental de 90°C de entrada de POME con un bajo suministro energético. Esta prueba alcanzó un periodo pseudoestacionario luego de 30 minutos de funcionamiento. Sin embargo, los sensores presentaron los inconvenientes de cableado discutidos en la sección 4.1.2.

Figura 49

Comportamiento de la presión durante las pruebas con temperatura de suministro de POME de 70°C y bajo suministro de energía



Los comportamientos y observaciones de la presión y temperatura son iguales que los indicados en la sección 4.1.2, pero se resalta una tendencia de recolección de condensados más irregular que las anteriores. Se condensó un total de 2462 g de agua del condensador y 2968 g de agua del vapor del calderín en un tiempo total de 232 minutos. Se considera que aconteció alguna

anormalidad en la operación de esta prueba, puesto que es la única combinación experimental con masas de condensado tan distantes.

Figura 50

Comportamiento de la temperatura durante las pruebas con temperatura de suministro de POME de 70°C y bajo suministro de energía

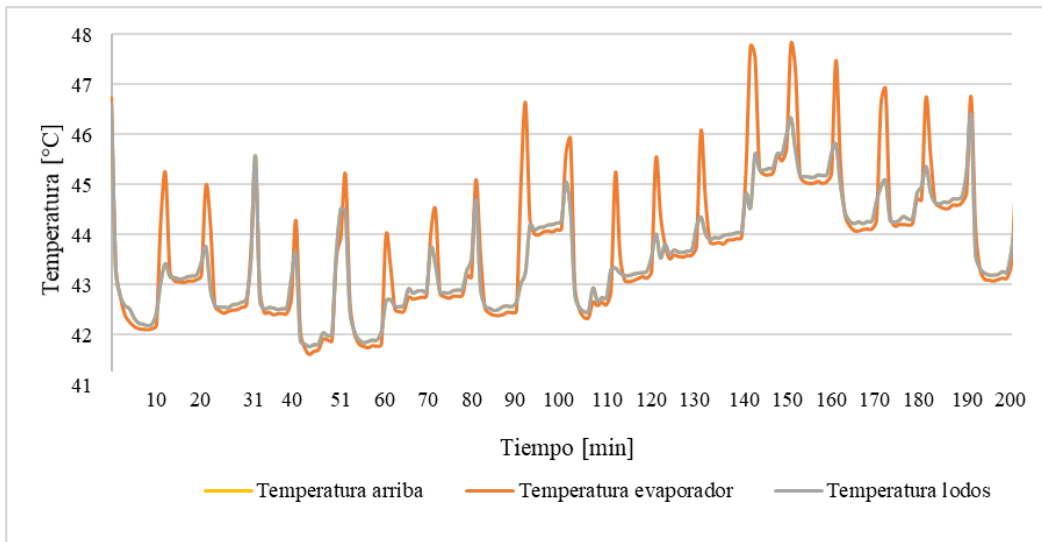


Figura 51

Comportamiento de la extracción de condensados del condensador durante las pruebas con temperatura de entrada de POME de 70°C y bajo suministro de energía

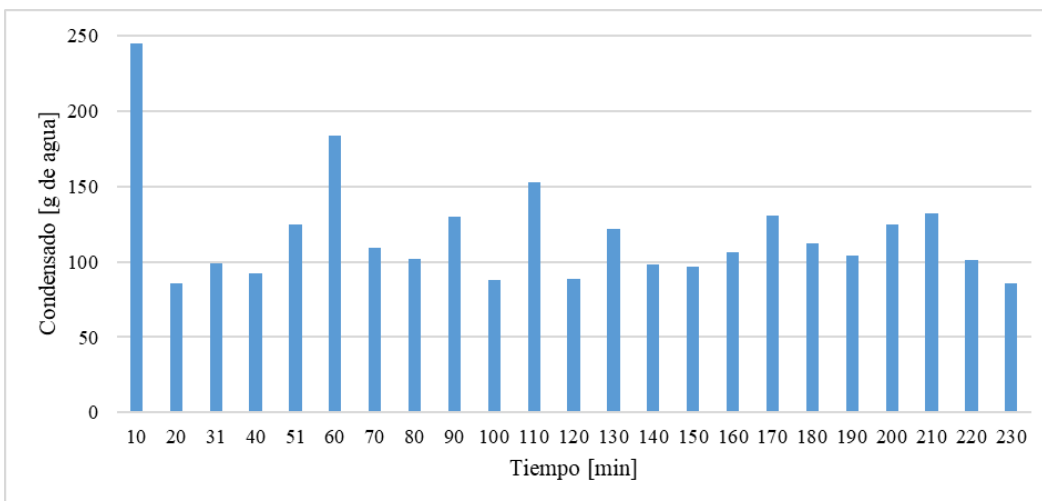
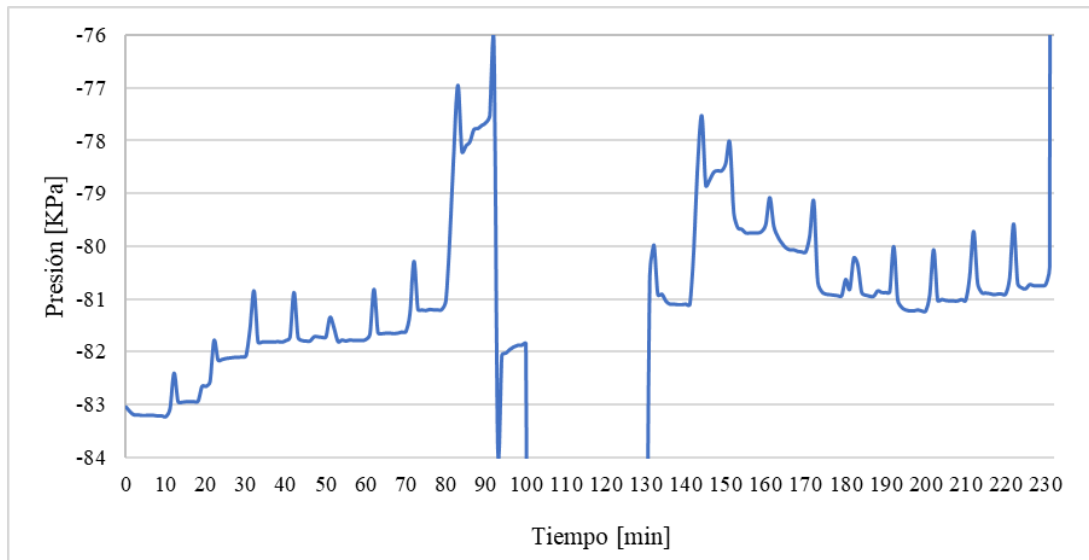


Figura 52

Comportamiento de la presión durante las pruebas con temperatura de entrada de POME de 90°C y bajo suministro de energía

**Figura 53**

Comportamiento de la temperatura durante las pruebas con temperatura de suministro de POME de 90°C y bajo suministro de energía

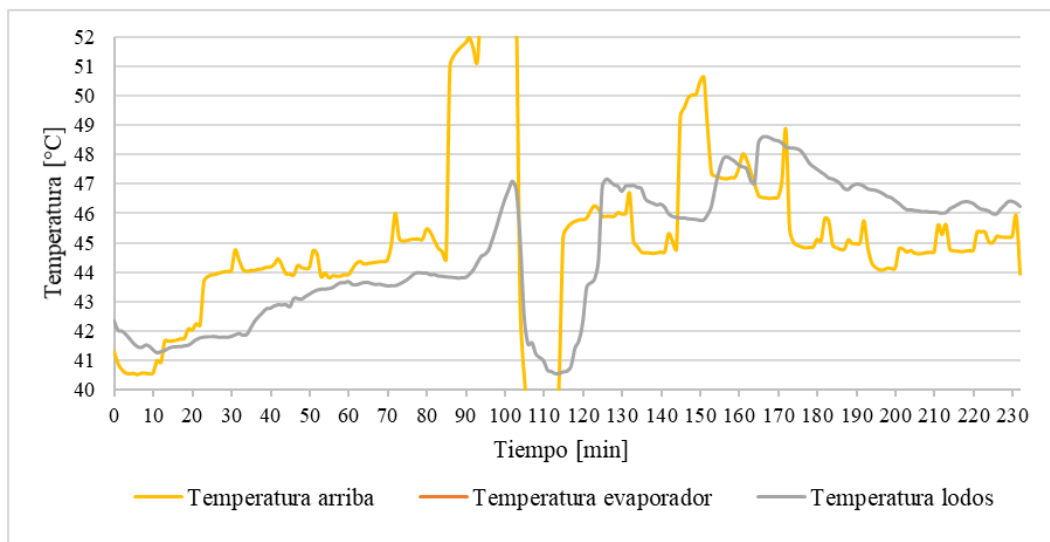
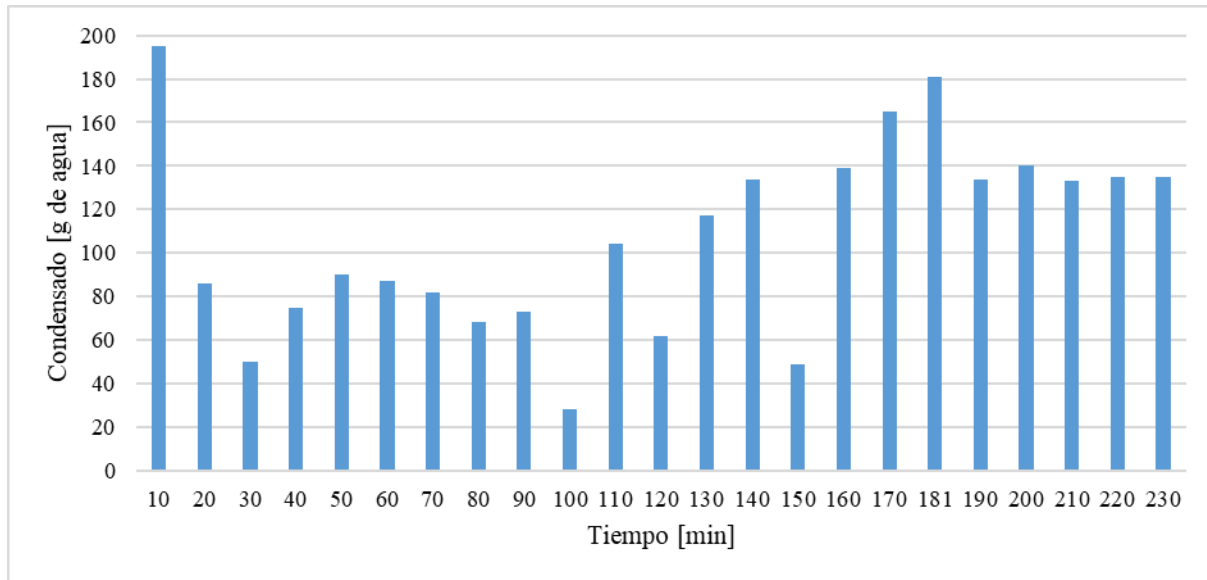


Figura 54

Comportamiento de la extracción de condensados del condensador durante las pruebas con temperatura de entrada de POME de 90°C y bajo suministro de energía



Anexo B. Desarrollo del modelo predictivo de regresión lineal

La comprobación de hipótesis es un paso necesario para verificar que los resultados obtenidos en el ANOVA (ver Tabla 11) sean válidos. Es decir, que el modelo del ANOVA se ajuste a los resultados analizados. Para ello, se llevó a cabo un análisis de residuos teniendo en cuenta todos los datos experimentales, el cual se apoya en los gráficos presentados en la Figura 55.

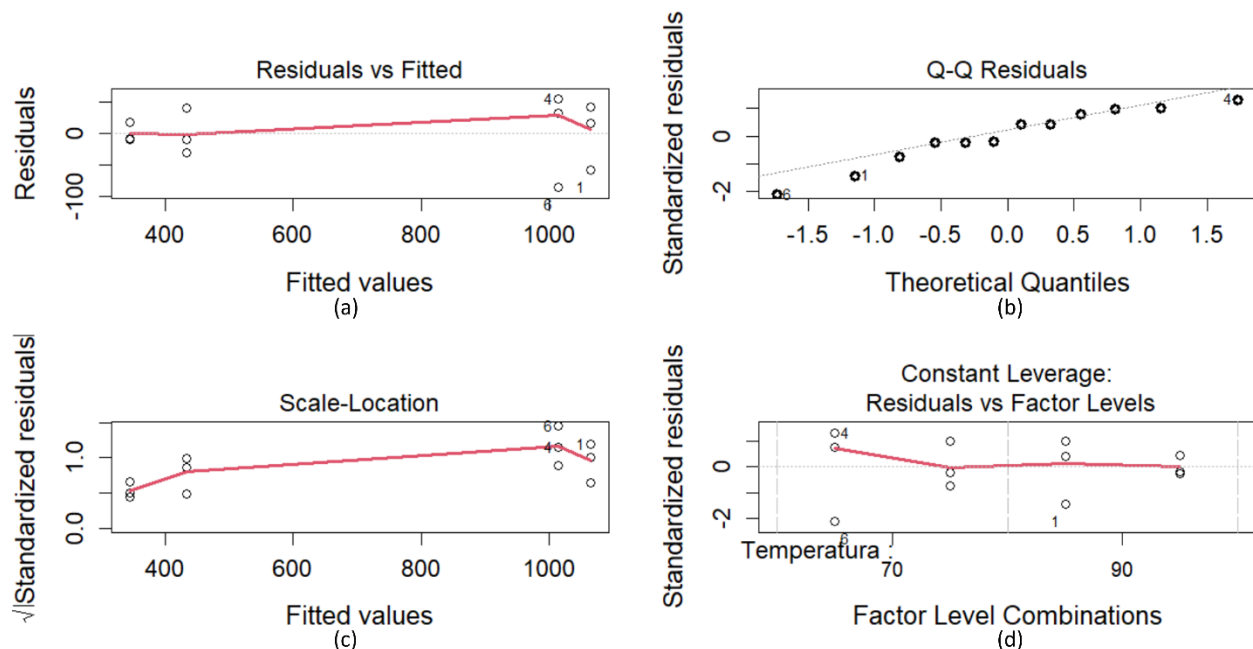
En la Figura 55-a se observa que los residuos están distribuidos de manera proporcional alrededor de la línea horizontal de 0. Esto favorece la relación de linealidad de las variables. Además, la línea de suavizado presenta una pendiente poco pronunciada, lo cual ayuda a asumir homocedasticidad de los residuos resultantes del ANOVA. En segundo lugar, no se identifica

ningún patrón claro o pronunciado de los valores ajustados, como una curva, por ejemplo. Esto complementa el supuesto de que los datos son independientes entre sí.

La Figura 55-b presenta un diagrama Cuantil-Cuantil (Q-Q) en el cual se observa que los residuos presentan una tendencia lineal que se ajusta a la línea de normalidad. Exceptuando cierta desviación en el punto 6 (Prueba P3T70H, ver Tabla 2) que no supone mayor problema. Esto sugiere que la distribución de los residuos es aproximadamente normal.

Figura 55

Gráficos de residuos considerando todos los datos experimentales



Nota. (a) Gráfico de residuos vs valores ajustados. (b) Gráfico Q-Q de los residuos. (c) Gráfico escala-localización. (d) Gráfico de residuos vs niveles de factores.

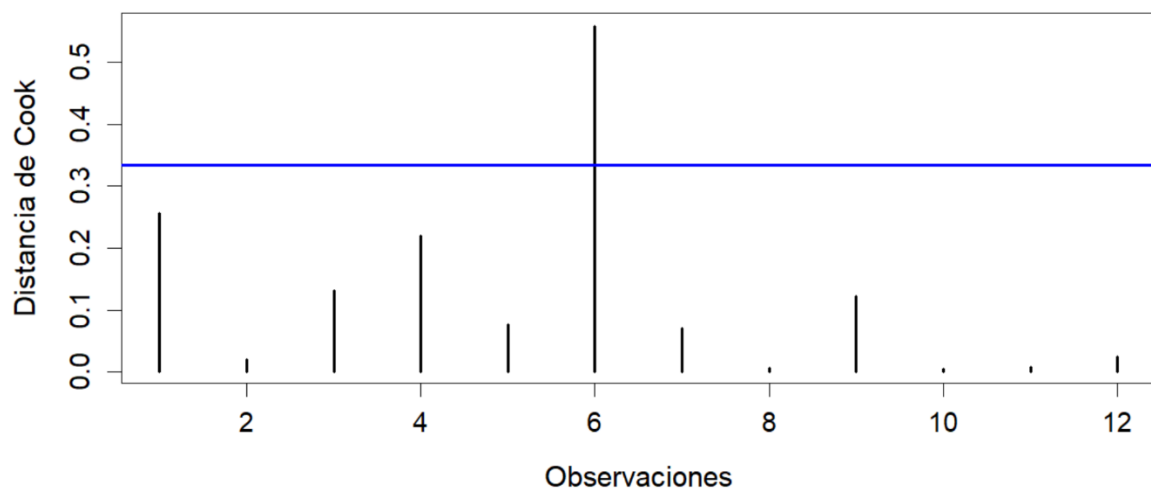
En el gráfico de escala-localización de la Figura 55-c se observa que alrededor de la línea de suavizado hay una dispersión de los puntos relativamente uniforme que no forma ningún patrón. Sin embargo, se identifica una ligera tendencia ascendente en los puntos 4 y 6 (pruebas P1T70H y

P3T70H respectivamente), provocando una mayor inclinación en la línea de suavizado del diagrama. Esto puede afectar la homocedasticidad y los resultados del modelo de ANOVA, pero no se considera suficiente evidencia para asumir que sea el caso.

La Figura 55-d presenta el diagrama de residuos contra factores de nivel, el cual identifica puntos influyentes que pueden tener un gran impacto en el ajuste del modelo de los resultados del ANOVA. Se identifica que los puntos están bien distribuidos alrededor de la línea de suavizado. Sin embargo, se destacan nuevamente los puntos 4 y 6 (pruebas P1T70H y P3T70H respectivamente), cuya distribución puede significar que distorsionan el ajuste del modelo a los datos experimentales. Por lo tanto, se llevó a cabo un análisis adicional por medio de la distancia de Cook para los 12 resultados considerados, como se presenta en la Figura 56.

Figura 56

Diagrama de la distancia de Cook para las 12 muestras de los resultados experimentales



Nota. se realizó en el entorno y lenguaje de programación R.

En este caso, los valores más influyentes son los puntos 1,4, y 6 (pruebas P1T90H, P1T70H y P3T70H respectivamente). Sin embargo, ninguno se encuentra cerca de 1. Por lo tanto, ninguno de estos valores es excesivamente influyente en el modelo. Sin embargo, como se mencionó en la

metodología del diseño de experimentos, en este caso, el umbral para una distancia de Cook aceptable es 0.33. Solo el valor 6 (Prueba P3T70H) sobrepasa este límite, por lo que sí podría tener una influencia significativa sobre el modelo del ANOVA. En estas circunstancias, se puede considerar retirar el valor 6 del análisis y realizar el modelo de regresión lineal para verificar si se ajusta mejor a los resultados.

En conclusión, los gráficos de residuos de la Figura 55 no indican problemas graves con la validez de los resultados del ANOVA. Su distribución normal está bien sustentada por el gráfico Q-Q y hay indicios menores de que la homocedasticidad no se cumpla, pero no es suficiente evidencia para asumirlo. Por último, no se presentan puntos excesivamente influyentes en el modelo de los resultados de ANOVA, pero hay uno cuya influencia puede ser importante.

La Tabla 18 presenta los coeficientes del modelo de regresión lineal sin descartar ningún dato de condensado total de los experimentos (ver Tabla 8).

Tabla 18

Resultados del modelo de regresión lineal sin descartar ningún dato experimental

Residuals				
Min	1Q	Median	3Q	Max
-86	-15.167	4.333	34.083	54
Coefficients				
	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
Intercept	432.67	28.8	15.025	3.80E-07
Temperatura90	-88.67	40.72	-2.177	0.0611
Energia12.35	581.33	40.72	14.275	5.65E-07
Temperatura90: Energia12.35	139	57.59	2.414	0.0423
Más parámetros				
RSE	R²	R² ajustado	F-statistic	P-value
49.88	0.9848	0.9791	172.4	1.318E-07
8 DF			3 and 8 DF	

Nota. se realizó en el entorno y lenguaje de programación R.

El modelo de regresión lineal de la Tabla 18 presenta un coeficiente de intercepto de 432.67, el cual coincide con la media de condensados obtenidos en la combinación experimental de 70°C de entrada de POME con bajo suministro energético. Dado su bajo P valor, este coeficiente es significativo para el modelo. Del mismo modo, se presenta un coeficiente de -88.67 correspondiente a la temperatura. Debido a su alto P valor (>0.05), no es un coeficiente estadísticamente significativo. Por otro lado, hay un coeficiente de 581.33 que sería el coeficiente del suministro energético, el cual es estadísticamente significativo para este modelo. Finalmente, se presenta un coeficiente de 139 que indica un efecto de interacción, y es estadísticamente significativo (P valor < 0.05).

Este modelo presenta un error residual estándar de 49.88 g de condensado. Esto quiere decir que, en promedio, las predicciones del modelo están a 49.88 g de los valores considerados. Se trata de un valor bajo y sugiere que las predicciones del modelo están relativamente cerca de los resultados de los experimentos (ver Tabla 8). Adicionalmente, el coeficiente de determinación ajustado (R^2 ajustado) tiene un valor 0.9791. Esto indica que casi el 98% de la variabilidad en la tasa de condensado es explicada por el modelo, teniendo en cuenta la cantidad de elementos predictores. Este es un valor alto, e indica un buen ajuste del modelo a los resultados experimentales. Dicho de otra forma, las variables del modelo son efectivas para predecir la tasa de condensado.

Por último, el modelo presenta un P valor de $1.318E-07$ ($\ll 0.05$). Esto hace que el modelo sea estadísticamente significativo. Reforzando el concepto de que se ajusta muy bien a los resultados experimentales. Por lo tanto, la combinación de predictores de temperatura y nivel de llama tienen un efecto significativo sobre la predicción de la tasa de condensado. Teniendo en cuenta especialmente los coeficientes estadísticamente significativos.

Como se mencionó anteriormente, vale la pena considerar un modelo predictivo que descarta la medida influyente del valor número 6 (Prueba P3T70H) que se identificó en la distancia de Cook (ver Figura 56), dicho valor corresponde al último condensado medido a 70°C de entrada de POME con alto suministro energético. Este modelo se presenta en la Tabla 19.

Tabla 19

Resultados del modelo de regresión lineal descartando una medida que puede ser influyente

Residuals				
Min	1Q	Median	3Q	Max
-58.33	-10.5	-8	17.33	41.67
Coefficients				
	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
Intercept	432.67	20.48	21.127	1.34E-07
Temperatura90	-88.67	28.96	-3.061	0.0183
Energia12.35	624.33	32.38	19.281	2.52E-07
Temperatura90:Energia12.35	96	43.44	2.210	0.0628
Más parámetros				
RSE	R²	R² ajustado	F-statistic	P-value
35.47	0.993	0.99	330.5	6.701E-08
7 DF			3 and 7 DF	

Nota. se realizó en el entorno y lenguaje de programación R.

Respecto al modelo anterior, el intercepto conserva el mismo valor y sigue siendo significativo para el modelo. El coeficiente de temperatura también se conserva, pero se vuelve estadísticamente significativo para el modelo. El coeficiente de suministro energético aumentó su valor, y sigue siendo bastante significativo para el modelo. Por último, el coeficiente de interacción disminuyó y deja de ser estadísticamente significativo. También podría considerarse marginalmente significativo. Es decir, pese a que supera la referencia de significancia, vale la pena considerarlo dentro del modelo, ya que su P valor no es muy distante de 0.05.

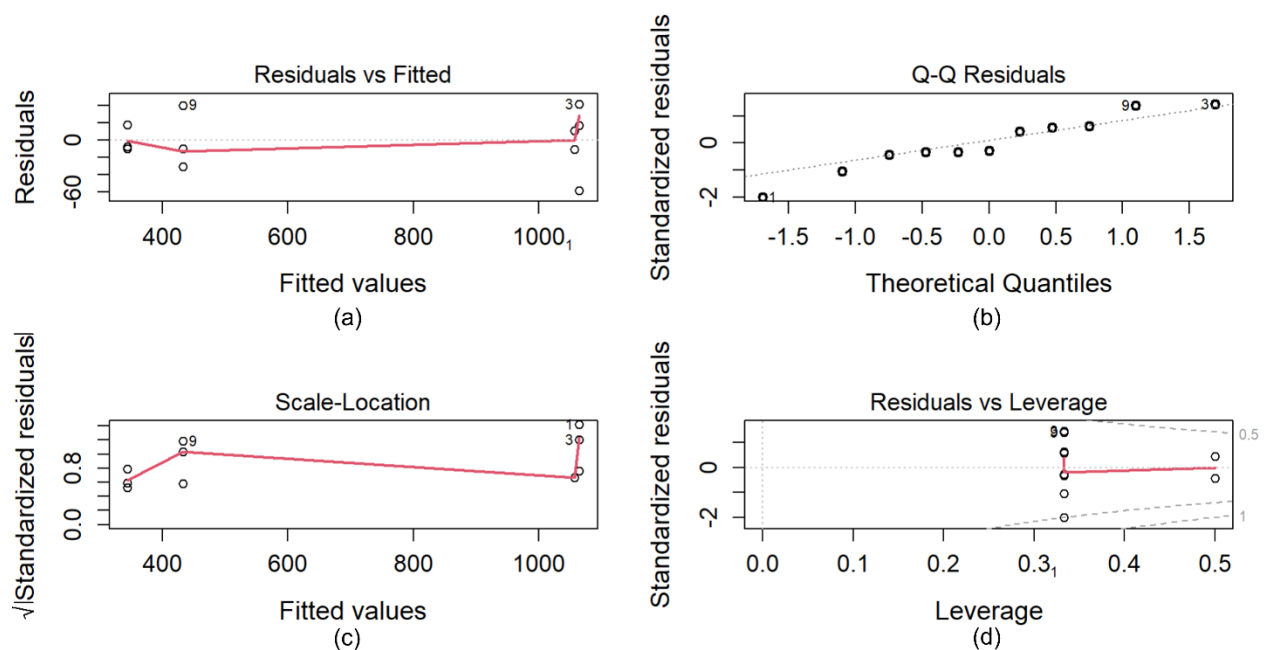
El nuevo modelo cuenta con una disminución en el error estándar residual, un coeficiente de determinación ajustado más alto, y un P valor mucho más bajo que el modelo anterior (ver

Tabla 19). Las predicciones de este modelo distan a 35.47 g de condensado en promedio de los resultados experimentales. Además, el modelo puede explicar el 99% de la variabilidad presentada en la tasa de condensado, y es estadísticamente significativo. Por lo tanto, el modelo parece haberse beneficiado de la eliminación de la medida 6 (Prueba P3T70H). A pesar de que la significancia del coeficiente de interacción disminuyó, el nuevo modelo presenta un mejor ajuste en la predicción de la tasa de condensado.

Al igual que en la sección anterior, se realizó una comprobación de hipótesis por medio del análisis de residuos para verificar la validez de los resultados del modelo de regresión lineal. Esto se llevó a cabo sobre el modelo modificado (ver Tabla 19) como se presenta en la Figura 57.

Figura 57

Gráficos de residuos del modelo de regresión lineal modificado



Nota. (a) Gráfico de residuos vs valores ajustados. (b) Gráfico Q-Q de los residuos. (c) Gráfico escala-localización. (d) Gráfico de residuos vs apalancamiento.

En la Figura 57-a los residuos están más cerca de la línea horizontal de 0 que en el modelo anterior. Además, siguen organizados proporcionalmente alrededor de esta línea y no hay ningún patrón claro en su distribución. Es decir, hay linealidad entre las variables y los datos siguen siendo independientes. En la Figura 57-b se observa que los residuos se ajustan muy bien a la línea de referencia normal. Puntos como el 1 o el 9 (Pruebas P1T90H y P3T70L respectivamente) presentan una desviación, pero en general, los residuos presentan una distribución aproximadamente normal.

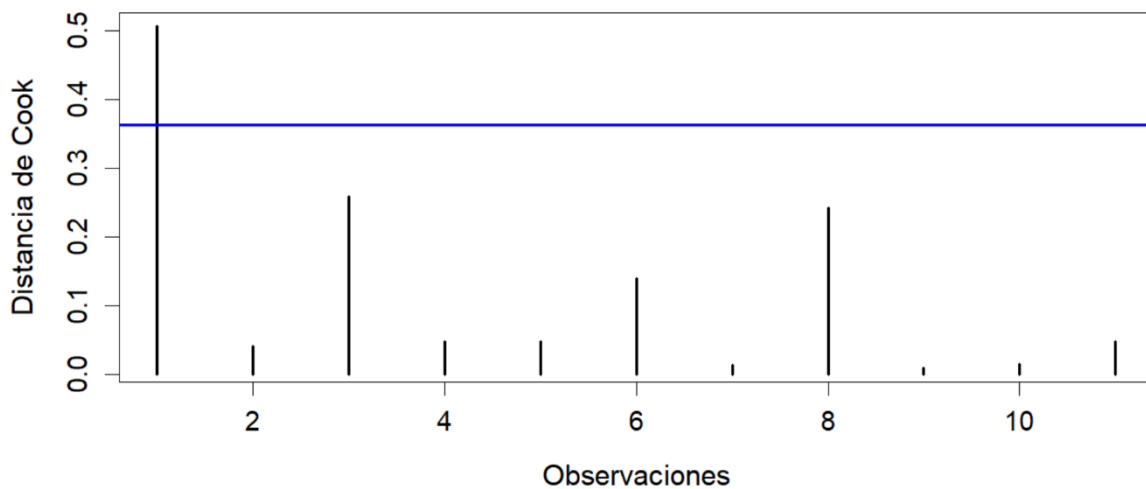
En la Figura 57-c, la línea de suavizado presenta una tendencia más horizontal que la versión anterior, y se presenta una distribución uniforme de los residuos estandarizados alrededor de esta, lo cual es buena señal de homocedasticidad. Los puntos 1 y 9 (Pruebas P1T90H y P3T70L respectivamente) presentan una desviación más alta, pero no se considera un acontecimiento relevante para asumir heterocedasticidad. Por último, en la Figura 57-d se observa que los residuos se encuentran en el rango de distancias de Cook inferiores a 0.5 y que la línea de suavizado presenta una tendencia mayormente horizontal. Por lo tanto, no se identifica ningún resultado con influencia excesiva en el ajuste del modelo. Adicionalmente, se analizó la distancia de Cook de los 11 resultados experimentales que tiene en cuenta el modelo ajustado, especialmente para verificar la influencia de los puntos 1 y 9 (Pruebas P1T90H y P3T70L respectivamente) que, pese al poco impacto, tuvieron presencia en las desviaciones del modelo. Este resultado se observa en la Figura 58.

Una vez más, ningún valor se acerca a 1, por lo que no hay ninguna observación significativamente importante. Pero se resalta el punto 1 (Prueba P1T90H), que corresponde a la primera medida del bloque de 90°C de entrada de POME con alto suministro energético. En este caso, el umbral tiene un valor de 0.36. El punto 1 (Prueba P1T90H) presenta una influencia menor que el punto 6 (Prueba P3T70H) en el análisis anterior (ver Figura 56), pero tiene una influencia

moderada que puede ser tenida en cuenta. Por lo tanto, se considera ajustar el modelo una vez más, descartando también el punto 1 (Prueba P1T90H). Estos son los resultados presentados en las secciones 4.2.3 y 4.3.

Figura 58

Distancia de Cook de las observaciones en el modelo modificado



Anexo C. Código del análisis estadístico en el entorno de R

A continuación, se anexa el código desarrollado en el lenguaje y entorno de programación R que se utilizó para llevar a cabo el análisis estadístico presentado en este proyecto.

```
# Datos

Temperatura <- factor(c(90, 90, 90, 70, 70, 70, 70, 70, 70, 90, 90, 90))

Energia <- factor(c(12.35, 12.35, 12.35, 12.35, 12.35, 12.35, 7.02, 7.02, 7.02, 7.02, 7.02, 7.02))

Condensado <- c(1006, 1081, 1106, 1068, 1046, 928, 402, 423, 473, 336, 334, 362)

data <- data.frame(Temperatura, Energia, Condensado)

# Prueba de normalidad para cada grupo

shapiro.test(data$Condensado[data$Temperatura == 90 & data$Energia == 12.35])

shapiro.test(data$Condensado[data$Temperatura == 90 & data$Energia == 7.02])
```

```
shapiro.test(data$Condensado[data$Temperatura == 70 & data$Energia == 12.35])
shapiro.test(data$Condensado[data$Temperatura == 70 & data$Energia == 7.02])

library(car)

# Prueba de Levene

leveneTest(Condensado ~ Temperatura * Energia, data = data)

anova_model <- aov(Condensado ~ Temperatura * Energia, data = data)

summary(anova_model)

# Crear el gráfico de interacción sin la leyenda

interaction.plot(data$Temperatura, data$Energia, data$Condensado,

                 type = "b", pch = 19, col = c("blue", "red"),

                 lty = 1, lwd = 2,

                 xlab = "Temperatura (°C)",

                 ylab = "Condensado Total (g de agua)",

                 main = "Gráfico de Interacción",

                 legend = FALSE,

                 cex.lab = 1.4,

                 cex.axis = 1.2)

# Añadir etiquetas al final de cada línea

text(x = 1.98, y = data$Condensado[data$Temperatura == 90 & data$Energia ==
12.35][1],

     labels = "Alta\n Energía", col = "red", pos = 4, cex = 1)

text(x = 1.99, y = data$Condensado[data$Temperatura == 90 & data$Energia ==
7.02][3]+1,
```

```
labels = "Baja\n Energía", col = "blue", pos = 4, cex = 1)

# Crear una nueva columna que combine Temperatura y Llama
data$Grupo <- interaction(data$Temperatura, data$Energia)

# Crear el diagrama de caja y bigotes
boxplot(Condensado ~ Grupo, data = data,

        col = c("lightblue", "lightgreen"), # Colores para los grupos

        main = "Boxplots de Condensado Total por Grupo",

        xlab = "Combinaciones experimentales",

        ylab = "Condensado Total (g de agua)",

        las = 1, # Rotar etiquetas del eje x

        cex.axis = 1.1,

        cex.lab=1.3) # Tamaño de las etiquetas del eje

## 1er Análisis de residuos

anova_model <- aov(Condensado ~ Temperatura * Energia, data = data)

par(mfrow = c(2,2))

plot(anova_model,

     cex.axis = 1.2,

     cex.lab=1.3,

     cex.main=2,

     lwd = 2

    )

# 1er Modelo

modelo <- lm(Condensado ~ Temperatura * Energia, data = data)
```

```
summary(modelo)

# Ver medidas específicas como la distancia de Cook

cooks_distance <- cooks.distance(modelo)

plot(cooks_distance, type = "h", main = "Distancia de Cook", ylab = "Distancia de
Cook",xlab = "Observaciones" )

abline(h = 1, col = "red") # Línea en 1 para referencia general

abline(h = 4/length(cooks_distance), col = "blue") # Línea de umbral basada en el tamaño
del conjunto de datos

# 2do Modelo. Sin el 1er punto influyente

modelo_sin_punto6 <- lm(Condensado ~ Temperatura * Energia, data = data[-c(6),])

summary(modelo_sin_punto6)

# Diagramas de residuos del 2do modelo

anova_model_pred <- lm(Condensado ~ Temperatura * Energia, data = data[-c(6),])

par(mfrow = c(2,2))

plot(anova_model_pred,

     cex.axis = 1.2,

     cex.lab=1.3,

     cex.main=2,

     lwd = 2)

summary(anova_model_pred)

## Distancia de Cook del 2do modelo

cooks_distance_mpm <- cooks.distance(modelo_sin_punto6)
```

```
plot(cooks_distance_mpm, type = "h", main = "Distancia de Cook", ylab = "Distancia de
Cook",xlab ="Observaciones",

      cex.lab=1.3,cex.axis=1.2,lwd=2)

abline(h = 1, col = "red") # Línea en 1 para referencia general

abline(h = 4/length(cooks_distance_mpm), col = "blue",lwd=2)

# 3er Modelo. Sin 2 puntos influyentes

modelo_sin_punto61 <- lm(Condensado ~ Temperatura * Energia, data = data[-c(1,6),])

summary(modelo_sin_punto61)

# Diagramas de residuos del 3er modelo

anova_model_pred3 <- lm(Condensado ~ Temperatura * Energia, data = data[-c(1,6),])

par(mfrow = c(2,2))

plot(anova_model_pred3,

      cex.axis = 1.2,

      cex.lab=1.3,

      cex.main=2,

      lwd = 2)

summary(anova_model_pred3)

# Distancia de Cook del 3er modelo

cooks_distance_mpm <- cooks.distance(modelo_sin_punto61)

plot(cooks_distance_mpm, type = "h", main = "Distancia de Cook", ylab = "Distancia de
Cook",xlab ="Observaciones",

      cex.lab=1.3,cex.axis=1.2,lwd=2)

abline(h = 1, col = "red") # Línea en 1 para referencia general
```

```
abline(h = 4/length(cooks_distance_mpm), col = "blue",lwd=2)

### Predicciones

# Datos de validación

datos_validacion <- data.frame(

  Temperatura = c(70, 70, 90, 90),

  Energia = c(12.35,7.02,12.35,7.02),

  Condensado_Observado = c(1014, 433, 1064, 344) # Valores observados

)

# Convertir los datos de validación a factores

datos_validacion$Temperatura <- factor(datos_validacion$Temperatura, levels =
levels(data$Temperatura))

datos_validacion$Energia <- factor(datos_validacion$Energia, levels =
levels(data$Energia))

# Generar predicciones de los datos de validación

predicciones <- predict(anova_model_pred3, datos_validacion)

# Calcular errores

errores <- datos_validacion$Condensado_Observado - predicciones

# Calcular métricas de error

mean(abs(errores)) #"MAE"

sqrt(mean(errores^2)) #"RMSE"

# Visualización de predicciones vs observados

plot(datos_validacion$Condensado_Observado, predicciones,

      main = "Predicciones vs Observados",
```

```
xlab = "Valores Observados",
ylab = "Valores Predichos",
cex.lab=1.3,cex.axis=1.2,lwd=2)
abline(0, 1, col = "red",lwd=2) # Línea ideal de y = x
# Preparación de intervalos de confianza y predicción
# Intervalos de confianza
predict(anova_model_pred3, interval = "confidence")
# Intervalos de predicción
predict(anova_model_pred3,interval="prediction")
# Visualización de intervalos de predicción
data_modelo_3<-data.frame(data[-
c(1,6),],predict(anova_model_pred3,interval="prediction"))
library(ggplot2)
ggplot(data_modelo_3,aes(x=fit))+
  geom_point(aes(y=Condensado))+
  geom_line(aes(y=fit),col="red")+
  geom_line(aes(y=upr),col="blue",linetype="dashed")+
  geom_line(aes(y=lwr),col="blue",linetype="dashed")+
  labs(x="Predicción de condensados (kg de agua)",y="Condensados experimentales (kg
de agua)")+
  theme_classic()+theme(axis.text.x=element_text(size=10,colour = "black"),axis.text.y
=element_text(size=10,colour = "black"))
# Visualización de intervalos de confianza
```

```

data_modelo_33<-data.frame(data[-
c(1,6),],predict(anova_model_pred3,interval="confidence"))

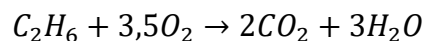
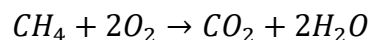
library(ggplot2)

ggplot(data_modelo_33,aes(x=fit))+
  geom_point(aes(y=Condensado))+
  geom_line(aes(y=fit),col="red")+
  geom_line(aes(y=upr),col="blue",linetype="dashed")+
  geom_line(aes(y=lwr),col="blue",linetype="dashed")+
  labs(x="Predicción de condensados (kg de agua)",y="Condensados experimentales (kg
de agua)")+
  theme_classic()+theme(axis.text.x=element_text(size=10,colour = "black"),axis.text.y
=element_text(size=10,colour = "black"))

```

Anexo D. Cálculo del consumo energético del sistema

Por estequiometria Asumiendo composición de gas natural 90% CH₄ y 10 % C₂H₆



1 mol de CH₄ requiere 2 moles de O₂, y 1 mol de C₂H₆ requiere 3,5 moles de O₂

Flujo de gas es 1.58 m³/h, lo convertimos a términos de moles de gas natural por hora, sabiendo que 1 mol de gas natural equivale a 22.4 L (Este valor es el mismo para CH₄ y para el C₂H₆)

$$Moles\ totales = \frac{1.58\ m^3/h}{22.4\ L/mol} * 1000\ L/m^3$$

$$Moles\ totales = 70.54\ mol_{Gas\ natural}/h$$

Considerando 90% de CH_4 y 10% de C_2H_6 para calcular el oxígeno.

$$(70.54 * 0.9)_{mol CH_4} * 2 \frac{mol O_2}{mol CH_4} = 126.98 \left(\frac{mol O_2}{h} \right)$$

$$(70.54 * 0.1)_{mol C_2H_6} * 3.5 \frac{mol O_2}{mol C_2H_6} = 24.68 \left(\frac{mol O_2}{h} \right)$$

$$mol O_2 \text{ necesarias} = 151.66 \left(\frac{mol O_2}{h} \right)$$

Aire requerido

$$n_{aire} = 151.66 mol O_2 * 4.76 = 721.90 \frac{mol Aire}{h}$$

Masa molar del aire (79% de Nitrógeno y 21% de Oxígeno)

$$M_{Aire} = 0.21 * 32 \frac{g}{mol O_2} + 0.79 * 28.0134 \frac{g}{mol N_2} = 28.8515 \frac{g}{mol Aire}$$

Calculamos el flujo masico de aire requerido.

$$m_{aire} = \frac{721.90 \frac{mol Aire}{h} * 28.8515 \frac{g}{mol Aire}}{1000} = 20.82 \frac{kg}{h}$$

Calculando el flujo masico de los gases de combustión

$$m_{gases} = m_{aire} + m_{gas \text{ Natural}} = 20.82 \frac{kg}{h} + 1.264 \frac{kg}{h} = 22.084 \frac{kg}{h}$$

Energía aportada por el gas Natural.

$$Q_{calderin} = PCI * m_{gas} = 44124 \frac{KJ}{kg} * 1.264 \frac{kg}{h} = 55772.7 \frac{KJ}{h}$$

$$Q_{calderin} = 55772.7 \frac{KJ}{h} * \frac{1}{3600} = 15.48 kW$$

Calculando las perdidas por gases de combustión en la chimenea.

$$\%Perdidas_{chimenea} = \left(\frac{(T_{chimenea} - T_{ambiente}) * Cp * m_{gases}}{PCI * m_{gas \text{ Natural}}} \right) * 100$$

$$\%Perdidas_{chimenea} = \left(\frac{(447.15^\circ K - 298.15^\circ K) * 2.34 \frac{KJ}{Kg * K} * 22.084 \frac{kg}{h}}{44124 \frac{KJ}{kg} * 1.264 \frac{kg}{h}} \right) * 100$$

$$\%Perdidas_{chimenea} = 13.8\%$$

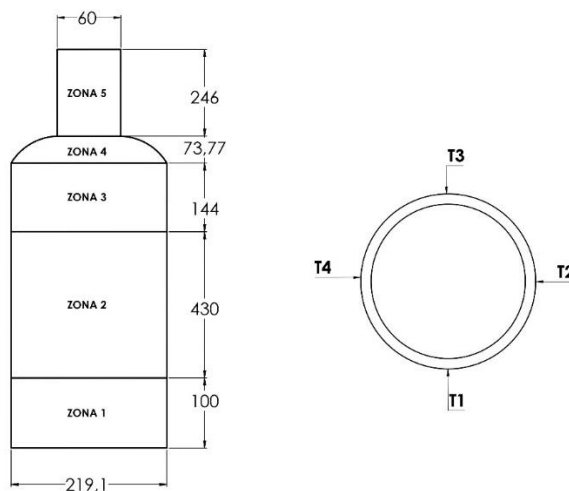
Perdidas de calor por convección de la caldera hacia el ambiente

Se dividió la caldera en 5 zonas y se tomó la temperatura en 4 puntos de manera radial en cada zona (ver Figura 59) para determinar un promedio de la temperatura superficial del calderín.

El resultado fue de 94.1°C.

Figura 59

Zonas de medición de temperatura en el calderín



Se tienen en cuenta las propiedades del aire de la tabla A15 del libro de Cengel y también las siguientes propiedades:

Coefficiente de expansión térmica volumétrica: $\beta = \frac{1}{T_f}$

Numero de Rayleigh (Flujo convectivo): $Ra = \frac{g * \beta * (T_s - T_\infty)}{\nu^2} * Pr$

Área lateral de un cilindro: $A_{cilindro} = \pi * D * h$

Numero de Garshof: $Gr = \frac{Ra}{Pr}$

Condición geométrica para el diámetro: $D \geq \frac{35*L}{Gr^{1/4}}$

Numero de Nusselt: $Nu = [0.825 + \frac{0.387*Ra^{1/6}}{(1+(\frac{0.492}{Pr})^{9/16})^{2/7}}]^2$

Coefficiente de transferencia de calor: $h = \frac{k}{Lc} * Nu$

Calor por convección: $Q_{conv} = h * As * (Ts - T_{\infty})$

Calor por radiación [°C]: $Q_{rad} = \epsilon * As * \sigma * (Ts^4 - T_{\infty}^4)$

Calor por radiación [K]: $Q_{rad} = \epsilon * As * \sigma * ((Ts + 273)^4 - (T_{\infty} + 273)^4)$

Para el cálculo de las pérdidas de calor hacia el ambiente se dividió la caldera en tres partes por la diferencia de geometría, se tuvo en cuenta la emisividad de la superficie de la caldera que se obtuvo por medio de un multímetro, la temperatura promedio de la superficie de la caldera y la constante de Stefan Boltzmann. Se usaron las ecuaciones de transferencia de calor por convección y radiación utilizando la ecuación de Nusselt para una placa vertical ya que se cumple $D \geq \frac{35*L}{Gr^{1/4}}$.

$\sigma = 5,67 \times 10^{-8} [W/m^2 * k^4]$

$\epsilon = 0,8$

$\beta = 0,00310 [k^{-1}]$

Los resultados se encuentran en la Tabla 20.

Tabla 20

Resultados de las pérdidas de energía por paredes del calderín

Nº	D [m]	L [m]	Ra	Gr [Ra/pr]	$D \geq \frac{35L}{Gr^{1/4}}$	Un	h [W/m2*C°]	As [m2]	Q_{conv} [W]	Q_{rad} [W]
1	0.2191	0.674	9.72E+08	1.38E+09	0.122	121.651	5.204	0.464	166.838	216.253
2	0.2191	0.07377	1.28E+06	1.81E+06	0.070	17.648	6.897	0.599	285.480	279.172
3	0.2191	0.246	4.73E+07	6.72E+07	0.095	48.86	5.726	0.046	18.201	21.439
Total									470.519	516.864

$$Q_{conv} = 0.471 [kW]$$

$$Q_{rad} = 0.517 [kW]$$

$$Q_{paredes} = Q_{conv} + Q_{rad} = 0.988 kW$$

$$\%Perdidas_{paredes} = \frac{0.988kW}{15.48 kW} * 100 = 6.38\% \text{ de la energía total}$$

$$\%Perdidas = \%Perdidas_{chimenea} + \%Perdidas_{paredes} = 6.38\% + 13.8\% = 20.18\%$$

$$Q_{Aprovechada} = 15.48 kW * 0.7982$$

Energía aprovechada por el calderín en 1 hora de prueba

$$Q_{Aprovechada} = 12.35 kWh$$

Energía sistema de calentamiento

Para el calentamiento (la resistencia eléctrica consume 10 A y el sistema de control 0.3 A) durante 20 min.

$$P_{Inicial} = 10 A + 0.3 A = 10.3A * 110V = 1.133 kW$$

Después de los 20 minutos la resistencia enciende 1 segundo cada 20 segundos aproximadamente

$$I_{Promedio} = 10 A * \frac{3 s}{60 s} = 0.5 A$$

$$I_{Total \text{ despues } 20 \text{ min}} = 0.5 A + 0.3 A = 0.8 A$$

$$P_{Despues} = 0.8 A * 110 V = 0.088 kW$$

Energía total consumida en 1 hora de prueba.

$$E = (1.133 kW * 0.33 h) + (0.088 kW * 0.66 h)$$

$$E = 0.4318 kWh$$

Para la torre de enfriamiento en 1 hora de funcionamiento

$$E_{Torre} = 12 A * 110 V * 1 hora = 1320 Wh = 1.32 kWh$$

Energía consumida bomba de vacío en 1 hora de funcionamiento

$$E_{Bomba\ Vacío} = 8.34 A * 110 V * 1 hora = 917.4 Wh = 0.9174 kWh$$

Anexo E. Ecuaciones de los modelos térmicos en el entorno de PYTHON

```
#MODELO EVAPORADOR DE CALANDRIA
```

```
from pyfluids import Fluid, FluidsList, Input
```

```
#"Basados en el proyecto de Gómez (2021), la presión atmosférica
```

```
# sería de 91 kPa y la temperatura ambiente de 23°C en Bucaramanga"
```

```
Pamb=91 # kPa
```

```
Tamb=23 # °C
```

```
# "Los experimentos se hicieron con un vacío de -80 kPa en promedio"
```

```
Pvac=80 # kPa
```

```
# "Presión absoluta"
```

```
P1=Pamb-Pvac
```

```
#"T1 es temperatura a la que ingresa el POME al sistema"
```

```
#"Según diagrama isoentálpico del agua, el POME entraría a 45°C aproximadamente"
```

```
T1=45 #°C
```

```
#"T2 es la temperatura de vapor saturado del POME luego de evaporarse"
```

```
T2=50 #°C
```

```
#"T3 es la temperatura del vapor saturado que proporciona el calderín"
```

```
Agua_calderin = Fluid(FluidsList.Water).dew_point_at_pressure(91000)
```

```
T3=Agua_calderin.temperature #°C
```

#"Con base en el proyecto de Gómez (2021) la temperatura del vapor condensado es la misma que cuando era vapor saturado"

$$T4=T3 \text{ #}^\circ\text{C}$$

#"Temperatura de salida del POME condensado"

$$T5=T2 \text{ #}^\circ\text{C}$$

#"Temperatura de entrada del agua de la torre al condensador"

$$T6=T_{amb} \text{ #}^\circ\text{C}$$

#"Temperatura de salida del agua de la torre del condensador"

$$T7=25 \text{ #}^\circ\text{C} \text{ "Basados en los apuntes de Gómez (2021)"}$$

#"Entalpia del POME cuando ingresa al sistema"

```
POME1=Fluid(FluidsList.Water).with_state(Input.pressure(P1*1000),
Input.temperature(T1))
h1=POME1.enthalpy/1000 #kJ/kg
POME2=Fluid(FluidsList.Water).with_state(Input.temperature(T2), Input.quality(100))
h2=POME2.enthalpy/1000 #kJ/kg
Agua_calderin3=Fluid(FluidsList.Water).with_state(Input.temperature(T3),
Input.quality(100))
h3=Agua_calderin3.enthalpy/1000 #kJ/kg
Agua_calderin4=Fluid(FluidsList.Water).with_state(Input.temperature(T4),
Input.quality(0))
h4=Agua_calderin4.enthalpy/1000 #kJ/kg
POME5=Fluid(FluidsList.Water).with_state(Input.temperature(T5), Input.quality(0))
h5=POME5.enthalpy/1000
```

```
Agua_torre6=Fluid(FluidsList.Water).with_state(Input.pressure(Pamb*1000),
Input.temperature(T6))

h6=Agua_torre6.enthalpy/1000

Agua_torre7=Fluid(FluidsList.Water).with_state(Input.pressure(Pamb*1000),
Input.temperature(T7))

h7=Agua_torre7.enthalpy/1000

#"Resistencia por conducción a través de las paredes de tubo"

dext=0.01902 # m

dint=0.0156 # m

Lic=0.3 # m "Diametros y longitud de tubo segun los resultados de Gómez (2021)"

ntubos=30

Kmat= 0.015 #"kW/m*K"

import math

Rcd1=math.log(dext/dint)/(Kmat*2*math.pi*Lic*ntubos) #"K/kW"

#"Area externa e interna del intercambiador"

A1=math.pi*dext*Lic*ntubos #m2

Aint1=math.pi*dint*Lic*ntubos #m2

#"Flujo de calor por ebullición nucleada"

mu_ev=POME1.dynamic_viscosity #kg/m*s

hfg=(h2-h1)*1000 #J/kg

g=9.81 # m/s^2

rhol=POME1.density #kg/m3
```

```

POME3=Fluid(FluidsList.Water).with_state(Input.pressure(P1*1000),
Input.temperature(T2))

rhov=POME3.density #kg/m3

sigma= 0.068 # N/m "Tomado de tabla 10.1 de Cengel capítulo 10.2"

Cpl=POME1.specific_heat #J/kg-°C

POME4 = Fluid(FluidsList.Water).dew_point_at_pressure(P1*1000)

Tsat=POME4.temperature #°C

Csf=0.0130 #"Tomado de tabla 10.3 de Cengel capítulo 10.2"

n=1 #"Tomado de tabla 10.3 de Cengel capítulo 10.2"

Pr=POME1.prandtl

deltaTexc=3.85 # K "Se asumen propiedades de ebullición nucleada"

Tsup=deltaTexc+Tsat # K o °C

qnucleada=mu_ev*hfg*((g*(rho_l-rhov)/sigma)**(1/2))*(((Cpl*(Tsup-
Tsat))/(Csf*hfg*(Pr**n)))**3)/1000 #kW/m2

#"Resistencia de convección interna dentro de los tubos"

hint1=qnucleada/(deltaTexc) #"Ahi sale hint en kW/m2*K o kW/m2*°C"

Rint1=1/(hint1*Aint1) #"K/kW"

#"Convección externa por condensación de película"

#"Resistencia por convección externa"

rho_v=Agua_calderin3.density #kg/m3

rho_l=Agua_calderin4.density #kg/m3

mu=Agua_calderin4.dynamic_viscosity #kg/m*s

hfgext=h3-h4 #kJ/kg

```

```

Ts=Tsup #"Asumo Temperatura de superficie acorde con la de la ebullición"

Tsatcond=T3 #"°C"

cp_l=Agua_calderin4.specific_heat/1000 #kJ/kg*K

hfg_ic1=(hfgext+0.68*cp_l*(Tsatcond-Ts))*1000 #J/kg

k_ic1=Agua_calderin4.conductivity

hext1=(0.943*(((k_ic1**3)*rho_l*(rho_l-rho_v)*hfg_ic1*g)/(mu*Lic*(Tsatcond-
Ts))))*0.25)/1000 #kW/m2*K

Rext1=1/(hext1*A1) #"K/kW"

#"Sumatoria de resistencias térmicas parciales"

Rtotal1=Rint1+Rext1+Rcd1 #"K/kW"

U1=1/(Rtotal1*A1) # kW/m2*K

#"Se calcula la diferencia media logarítmica de acuerdo con Cengel capítulo 11.4"

deltaT1=T3-T1

deltaT2=T4-T2

LMTD=((deltaT1-deltaT2)/math.log(deltaT1/deltaT2))

#"Transferencia de calor"

Q1=U1*A1*LMTD # kW

## CONDENSADOR

#"Flujo másico de la torre"

magua=0.00105 # m3/seg "La torre tiene un flujo de 63 L/min"

#"Convección externa por condensación de película"

#"Resistencia por convección externa"

rho_ICOND= POME5.density #kg/m3

```

```

rho_vCOND= POME2.density #kg/m3

muCOND= POME5.dynamic_viscosity #kg/m*seg

hfgextCOND=h2-h5 #kJ/kg

TsCOND=28 # °C "Asumo Temperatura de superficie más o menos acorde a la
temperatura del agua dentro de los tubos"

TsatCOND=Tsat #°C" "Temperatura de saturación del POME a presión absoluta,
tratandolo como agua"

deltaT=TsatCOND-TsCOND

cp_1_COND=POME5.specific_heat/1000 #kJ/kg*K

hfg_c2=(hfgextCOND+0.68*cp_1_COND*(deltaT))*1000 #J/kg

k_ic1COND=POME5.conductivity #W/m*°C

hext2=(0.943*(((k_ic1COND**3)*rho_1COND*(rho_1COND-
rho_vCOND)*hfg_c2*g)/(muCOND*Lic*(TsatCOND-TsCOND))))**0.25)/1000 #kW/m2*K

Rext2=1/(hext2*A1) #K/Kw

#"Resistencia de convección interna dentro de los tubos"

#"Asumiendo un caso de convección interna forzada"

#"Temperatura promedio del agua de la torre"

Tprom=(T6+T7)/2 #°C"

A_trans=(math.pi/4)*(dint**2)*ntubos #"m^2" "Area de la sección transversal de los tubos
del condensador"

V=magua*(1/A_trans) # m/seg

Agua_torre_prom=Fluid(FluidsList.Water).with_state(Input.temperature(Tprom),
Input.quality(0))

```

```

rho_agua=Agua_torre_prom.density

mu_agua=Agua_torre_prom.dynamic_viscosity

Re=(V*dint*rho_agua)/mu_agua #"Definición de Reynolds, tomada de Cengel, capítulo
8"

#"Ecuación de Nussel"

k_agua=Agua_torre_prom.conductivity/1000

Pr_agua=Agua_torre_prom.prandtl

#"El Reynolds indica flujo aproximadamente laminar, no es completamente desarrollado,
estaría en la región de entrada"

Nus=3.66+(((0.065*(dint/Lic)*Re*Pr_agua)/(1+0.04*(((dint/Lic)*Re*Pr_agua)**(2/3))))

hint2=(Nus*k_agua)/dint # kW/m2*K

Rint2=1/(hint2*Aint1) #"K/kW"

#"Sumatoria de resistencias térmicas parciales"

Rtotal2=Rint2+Rext2+Rcd1 # K/kW

U2=1/(Rtotal2*A1) # kW/m2*K

#"Se calcula la diferencia media logarítmica de acuerdo con Cengel capítulo 11.4"

deltaT3=(T2-T6)

deltaT4=(T5-T7)

LMTD2=((deltaT3-deltaT4)/math.log(deltaT3/deltaT4))

#"Transferencia de calor"

Q2=U2*A1*LMTD2 #"kW"

```

Anexo F. Resultados de laboratorio del análisis fisicoquímico de las muestras de POME

A continuación, se presentan los resultados de los análisis fisicoquímicos que se aplicaron sobre las muestras de POME por medio del laboratorio certificado ECOSAM.



ECOSAM S.A.S.
FORMATO REPORTE DE RESULTADOS



F-68
Versión: 6
Fecha: 2021/04/15
Pág. 1 de 2

INFORMACIÓN GENERAL DEL REPORTE			
Número ECOSAM	313-24_Versión_2	Fecha reporte	2024-09-16
Nombre cliente	Phina Biosoluciones	Ciudad	Bucaramanga
Contacto	Alejandra Viviescas	Dirección	Cra 28 # 20-80
Teléfono / email	aviviescas@phinabiosoluciones.com / 3203455436	NIT o id.	900889627
Nombre proyecto	Análisis fisicoquímico	Sitio (proyecto)	No registra
Muestreo propio	No aplica	Muestreo cliente	No facilitado
OBSERVACIONES			
Una vez expedido el reporte de resultados, el cliente dispondrá de 8 días hábiles para realizar las observaciones pertinentes sobre este. Este reporte hace referencia únicamente a la(s) muestra(s) analizada(s) y relacionadas en él. Cualquier reproducción (total o parcial) requiere de la autorización de ECOSAM SAS. a. Análisis acreditados en ECOSAM SAS. Resolución N° 2868 del 22 de diciembre de 2022. IDEAM b. Análisis no acreditados realizado en ECOSAM SAS Referencia (SM): Standard Methods for examination of water and wastewater ED. 24 Nota 1: Se realiza version 2 del reporte donde se corrige el resultado del parámetro de cloruros ya que se habia presentado un error en la digitación, queda anulada la versión anterior.			

REPORTE DE RESULTADOS POR PUNTO DE MUESTREO						
INFORMACIÓN GENERAL DEL PUNTO DE MUESTREO						
Número ECOSAM:	313-24-01					
Nombre punto de muestreo:	POME					
Tipo de matriz de la muestra:	Agua residual no doméstica (ARND)					
Coordenadas del punto de muestreo:	No facilitadas					
Plan de muestreo (Número ECOSAM - Cuadrilla de trabajo):	No aplica					
Identificación asignada a la muestra por el cliente (cuando aplique):	No facilitada					
OBSERVACIONES						
INFORMACIÓN Y RESULTADOS ANÁLISIS LABORATORIO DEL PUNTO DE MUESTREO PARA MUESTRAS FISICOQUÍMICAS Y MICROBIOLÓGICAS						
Tipo de muestra:	Simple (S)	Fecha muestreo:	2024-08-20	Fecha recepción:	2024-08-23	
Análisis	Método / Referencia	Límite de cuantificación	Fecha final de análisis	Unidades	Resultado	
a. DBO5	Incubación 5 días, electrodo de membrana / SM 5210 B; 4500-O G	<1,00	2024-08-29	mg/L	15349	
a. DQO	Reflujo cerrado y Volumétrico / SM 5220 C	<20,0	2024-09-04	mg O ₂ /L	> 35000 (71998)	
a. Cloruros	Argentométrico / SM 4500-Cl- B	<3,00	2024-09-03	mg Cl-/L	1.702	
INFORMACIÓN GENERAL DEL PUNTO DE MUESTREO						
Número ECOSAM:	313-24-02					
Nombre punto de muestreo:	CONCENTRADO					
Tipo de matriz de la muestra:	Agua residual no doméstica (ARND)					
Coordenadas del punto de muestreo:	No facilitadas					
Plan de muestreo (Número ECOSAM - Cuadrilla de trabajo):	No aplica					
Identificación asignada a la muestra por el cliente (cuando aplique):	No facilitada					
OBSERVACIONES						
INFORMACIÓN Y RESULTADOS ANÁLISIS LABORATORIO DEL PUNTO DE MUESTREO PARA MUESTRAS FISICOQUÍMICAS Y MICROBIOLÓGICAS						
Tipo de muestra:	Simple (S)	Fecha muestreo:	2024-08-20	Fecha recepción:	2024-08-23	
Análisis	Método / Referencia	Límite de cuantificación	Fecha final de análisis	Unidades	Resultado	
a. DBO5	Incubación 5 días, electrodo de membrana / SM 5210 B; 4500-O G	<1,00	2024-08-29	mg/L	15477	
a. DQO	Reflujo cerrado y Volumétrico / SM 5220 C	<20,0	2024-09-04	mg O ₂ /L	> 35000 (70195)	
a. Cloruros	Argentométrico / SM 4500-Cl- B	<3,00	2024-09-03	mg Cl-/L	3.243	



ECOSAM S.A.S.
FORMATO REPORTE DE RESULTADOS



F-68
 Versión: 6
 Fecha: 2021/04/15
 Pág. 2 de 2

INFORMACIÓN GENERAL DEL PUNTO DE MUESTREO					
Número ECOSAM:	313-24-03				
Nombre punto de muestreo:	DESTILADO				
Tipo de matriz de la muestra:	Agua residual no doméstica (ARND)				
Coordenadas del punto de muestreo:	No facilitadas				
Plan de muestreo (Número ECOSAM - Cuadrilla de trabajo):	No aplica				
Identificación asignada a la muestra por el cliente (cuando aplique):	No facilitada				
OBSERVACIONES					
INFORMACIÓN Y RESULTADOS ANÁLISIS LABORATORIO DEL PUNTO DE MUESTREO PARA MUESTRAS FISIQUÍMICAS Y MICROBIOLÓGICAS					
Tipo de muestra:	Simple (S)	Fecha muestreo:	2024-08-20	Fecha recepción:	2024-08-23
Análisis	Método / Referencia	Límite de cuantificación	Fecha final de análisis	Unidades	Resultado
a. DBO5	Incubación 5 días, electrodo de membrana / SM 5210 B, 4500-O G	<1,00	2024-08-29	mg/L	229
a. DQO	Reflujo cerrado y Volumétrico / SM 5220 C	<20,0	2024-09-04	mg O ₂ /L	485
a. Cloruros	Argentométrico / SM 4500-Cl- B	<3,00	2024-09-03	mg Cl-L	< 3,00
ANEXOS					
1) INFORMACIÓN PARÁMETROS ACREDITADOS DE ECOSAM SAS					
Acidez total, alcalinidad total, calcio disuelto, carbonato, bicarbonato, hidróxidos, cloruros, conductividad eléctrica, demanda bioquímica de oxígeno, DQO, dureza cálcica, dureza total, fenoles, fósforo ácido hidrolizable disuelto, fósforo ácido hidrolizable total, fósforo orgánico total, fósforo reactivo disuelto (Leído como Ortofosfatos), fósforo reactivo total (Leído como Ortofosfatos), fósforo orgánico disuelto, fósforo total, grasas y aceites, hidrocarburos, metales disueltos [Cadmio, Cromo, Cobre, Hierro, Níquel, Plata Plomo, Zinc, Potasio, Sodio, Aluminio, Vanadio, Magnesio], Metales Totales [Arsénico, Selenio, Cadmio, Cromo, Cobre, Hierro, Níquel Plata Plomo, Zinc, Calcio, Magnesio, Potasio, Sodio, Aluminio, Vanadio], nitrato, nitrilo, nitrógeno amoniacal, sólidos disueltos totales, sólidos sedimentables, sólidos suspendidos totales, sólidos totales, sulfatos, turbidez. Toma de muestra compuesta [pH, temperatura, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, sólidos sedimentables, caudal]. Toma de muestra en agua subterránea [pH, temperatura, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, sólidos sedimentables]. Toma de muestra simple [pH, temperatura, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, sólidos sedimentables, caudal]. Fitoplancton, macrofitas acuáticas, macroinvertebrados bentónicos, macroinvertebrados asociados a macrofitas, peces, perfiton y zooplancton.					

REVISÓ

 July Adriana Torres Velásquez
 Directora Lab. Aguas

APROBO

 Elkin Mauricio Gutierrez Durán
 Director técnico

FIN DEL REPORTE