APLICACIÓN DE PROGRAMACIÓN LINEAL PARA LA REDUCCIÓN DE COSTOS EN EL PROCESO DE SECADO DE BIOMASA FORESTAL: UN CASO DE ESTUDIO

NATALIA SALAZAR OROZCO

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
SANTIAGO DE CALI, COLOMBIA
2024

APLICACIÓN DE PROGRAMACIÓN LINEAL PARA LA REDUCCIÓN DE COSTOS EN EL PROCESO DE SECADO DE BIOMASA FORESTAL: UN CASO DE ESTUDIO

NATALIA SALAZAR OROZCO

PROPUESTA DE PROYECTO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO QUÍMICO

Director:

JUAN SEBASTIÁN GUERRERO, M. Sc., Ph. D.

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
SANTIAGO DE CALI, COLOMBIA
2024

RESUMEN

El presente caso de estudio se centra en la reducción de costos en el proceso de secado de biomasa forestal, utilizando un modelo de programación lineal para reducir los costos asociados a este proceso. El objetivo principal fue minimizar los costos operacionales y de inversión, considerando variables críticas como la temperatura de secado y la altura del lecho. La investigación destacó la importancia económica de controlar estas variables para lograr un secado eficiente de la biomasa.

La metodología implementada consistió en la construcción de un modelo de programación aplicado a un secador de lecho continuo de biomasa forestal, el cual opera utilizando aire caliente que fluye a través de un lecho de material colocado sobre un transportador perforado. El tamaño del secador y el tiempo de secado fueron determinados utilizando una curva característica de secado. Este modelo integró las restricciones impuestas por el diseño del equipo y la eficiencia térmica mínima. Se realizó un análisis de escenarios para diferentes combinaciones de temperatura y altura de lecho para encontrar la configuración que permite minimizar los costos sin comprometer la eficiencia.

El modelo fue validado mediante un caso de estudio que considera las condiciones de una industria del Valle del Cauca. Los resultados mostraron que la mejor configuración se alcanzó a una temperatura de 90°C y una altura del lecho de 0.5m. Esta combinación resultó en el costo total más bajo de $295,492 USD. A esta temperatura, el tiempo de secado se redujo significativamente, lo que disminuyó el consumo de energía.

Se puede concluir que el modelo formulado permitió identificar configuraciones de operación adecuadas y puede utilizarse para minimizar costos de secado de otros materiales, si se dispone de la curva de secado característica del material. Se recomienda la implementación de estrategias operativas como la recuperación de calor residual y la optimización dinámica de la velocidad del aire.

Palabras clave: Secado de biomasa, modelización, programación lineal, costos operacionales.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....1
2. OBJETIVOS.....2
2.1. OBJETIVO GENERAL.....2
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....2
3. MARCO CONCEPTUAL.....3
3.1. Biomasa.....3
3.2. Conversión Energética de Biomasa.....4
3.2.1. Secado de sólidos.....5
3.3. Programación Lineal.....6
4. ANTECEDENTES.....8
5. METODOLOGÍA.....10
5.1. Definición del equipo para la aplicación de programación lineal.....11
5.2. Desarrollo del modelo.....12
5.3. Caso de estudio.....15
6. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....18
6.1 Análisis de escenarios.....18
6.2 Estrategías para mejorar la eficiencia operativa.....22
7. CONCLUSIONES.....23
8. RECOMENDACIONES.....24
9. REFERENCIAS.....25
ANEXOS.....29

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros del proceso..... 16

Tabla 2. Análisis de costos en función de temperatura y altura de lecho..... 19

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Código del modelo desarrollado..... 29

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Clasificación de la biomasa..... 3

Figura 2. Esquema de cadena de combustible de biomasa forestal..... 4

Figura 3. Esquema de actividades para el desarrollo de un modelo..... 7

Figura 4. Metodología para el desarrollo del modelo de minimización de costos de secado.....10

Figura 5. Esquema de un secador de lecho continuo..... 12

Figura 6. Descripción de la configuración de secado..... 16

Figura 7. Resultados de la optimización del modelo..... 18

Figura 8. Gráfico para el efecto de las variables del modelo sobre los costos totales..... 21

NOMENCLATURA

A_{sec}	Área de la sección transversal de un secador continuo.	m^2
$C_{calor,i}$	Precio del calor	USD/MWh
C_{cap}	Costos de inversión	USD
C_{elec}	Precio de la electricidad	USD/MWh
C_{ope}	Costos operacionales	USD
c_p	Capacidad calorífica	kJ/kg °C
C_{tot}	Costos totales del secador	USD
fa	Factor de anualidad	
h	Entalpía	kJ/kg
ṁ	Flujo másico	kg/s
η_{ven}	Eficiencia de los ventiladores	
P_{elec}	Consumo de electricidad de los ventiladores	MW
ΔP_{pres}	Caída de presión en el secado	Pa
Q	Calor	kW
T	Temperatura	°C
v	Velocidad del aire en la entrada de los ventiladores	m/s
x	Contenido de humedad del aire	kg_{agua} / kg_{as}
Z	Altura del lecho	m
φ_i	Consumo de calor del secador	MWh
λ	Tiempo de funcionamiento anual del secador	h
ρ	Densidad aparente	kg/m^3
δ	Densidad	kg/m^3
τ	Tiempo de secado	s
as	Aire seco	
bs	Sólido en base seca	
db	Bulbo seco	
v	Vapor	
wb	Bulbo húmedo	
wc	Agua caliente	

1. INTRODUCCIÓN

La industria energética a nivel mundial enfrenta grandes desafíos relacionados con la sostenibilidad y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, lo que ha impulsado la búsqueda de fuentes de energía renovables. Dentro de estas, la biomasa forestal ha demostrado ser una alternativa viable para la generación de energía limpia, aprovechando residuos biológicos que, en otras circunstancias, serían desechados (Ayala-Mendivil et al., 2018). Sin embargo, uno de los mayores retos es su alto contenido de humedad, que impacta negativamente su eficiencia como combustible, disminuyendo su poder calorífico y provocando fluctuaciones en la combustión (Salinas, 2021).

De acuerdo con la investigación de Holmberg y Athila (2004), los biocombustibles derivados de la madera pueden tener un contenido de humedad que varía entre el 50% y 63%, lo que disminuye la eficiencia energética en procesos térmicos, ocasionando pérdidas de hasta un 18% en la energía neta disponible. El informe Renewable Energy Technologies: Cost Analysis Series señala que, a medida que la biomasa reduce su contenido de humedad, el costo energético asociado también disminuye. Por ejemplo una biomasa con un 60% de humedad tiene un costo de aproximadamente 30-35 USD/GJ, mientras que una biomasa con 10% de humedad puede reducir este valor a 5-10 USD/GJ. Esto evidencia la importancia del secado como una estrategia clave para mejorar el rendimiento energético, ya que una biomasa con menor humedad favorece una combustión más eficiente y un mejor aprovechamiento del recurso (Deboni et al., 2018).

Gracias a su fuerte desarrollo agroindustrial, el Valle del Cauca presenta un gran potencial para el aprovechamiento de biomasa forestal en la generación de energía renovable. Una investigación llevada a cabo por la Universidad Nacional de Colombia, indica que la región posee una capacidad estimada de 151 PJ (Peta Joule) para la producción de energía a partir de biomasa (UNAL, 2018). Sin embargo, uno de los principales retos para la implementación de estos proyectos es el elevado costo del proceso de secado (Delgado, 2014). En este contexto, el uso de la programación lineal adquiere especial importancia, ya que permite optimizar variables operativas como la temperatura, la presión y el tiempo de secado, logrando una disminución notable de los costos sin afectar la eficiencia del proceso (Céspedes, 2021)

El uso exitoso de la programación lineal en diferentes industrias ha permitido la optimización de procesos bajo restricciones lineales. En el proceso de secado de biomasa, estudios como los realizados por Bosio y Santa (2023) han evidenciado su efectividad en la reducción de costos operacionales y energéticos en la industria. Myllymaa et al. (2018) aplicaron modelos de optimización para secadores de biomasa, destacando cómo la variación de factores como la temperatura pueden reducir el consumo de energía y potenciar la eficiencia térmica. Su implementación en la industria del Valle del Cauca beneficiaría a las empresas locales, fomentando el uso de energías renovables y la utilización eficiente de residuos forestales, lo cual a su vez impulsará el crecimiento sostenible de la región.

La aplicación de la programación lineal en el secado de biomasa favorece los principios de la economía circular, al integrar el aprovechamiento de residuos con procesos energéticos eficientes (Rahma et al., 2024). Esto no solo contribuye a la reducción de la huella de carbono, sino que también impulsa un desarrollo económico más sostenible, un aspecto clave para el Valle del Cauca en su esfuerzo por disminuir la dependencia de combustibles fósiles (Moya, 2017). La implementación de este modelo permite reducir considerablemente los costos de secado, fortaleciendo así la competitividad de las empresas de la región en su transición hacia fuentes de energía renovable (Brand & Giesel, 2017). El presente trabajo se enfocó en un único caso de estudio con el objetivo de establecer un análisis detallado y preciso del modelo propuesto, el cual se centra en la reducción de costos mediante el análisis de variables operativas como la temperatura y la altura de lecho. Sin embargo, aspectos como la degradación térmica del material, el impacto de las fluctuaciones estacionales en la humedad, los costos de mantenimiento del equipo y variaciones en el tipo de biomasa no fueron considerados.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un modelo de Programación Lineal para reducir los costos asociados al proceso de secado de biomasa forestal.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Formular un modelo matemático que represente la relación entre los costos y las variables del proceso de secado, utilizando principios de Programación Lineal.
- Determinar estrategias operativas para reducir los costos del proceso de secado de biomasa, basándose en los resultados del modelo de Programación Lineal.

3. MARCO CONCEPTUAL

3.1. Biomasa

La Directiva (UE) 2018/2001 define la biomasa como la fracción biodegradable de productos, residuos y desechos biológicos provenientes de la agricultura, la silvicultura y las industrias relacionadas, así como de residuos municipales e industriales. La biomasa es una alternativa energética valiosa, ya que puede transformarse en combustibles sólidos, líquidos o gaseosos mediante diversos procesos. Como se muestra en la Figura 1, según su composición, origen y estado, la biomasa puede clasificarse en categorías tales como amilácea, oleaginosa, alcoholígena y lignocelulósica, siendo esta última, compuesta principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina, la más utilizada en procesos energéticos (Wang et al., 2017).

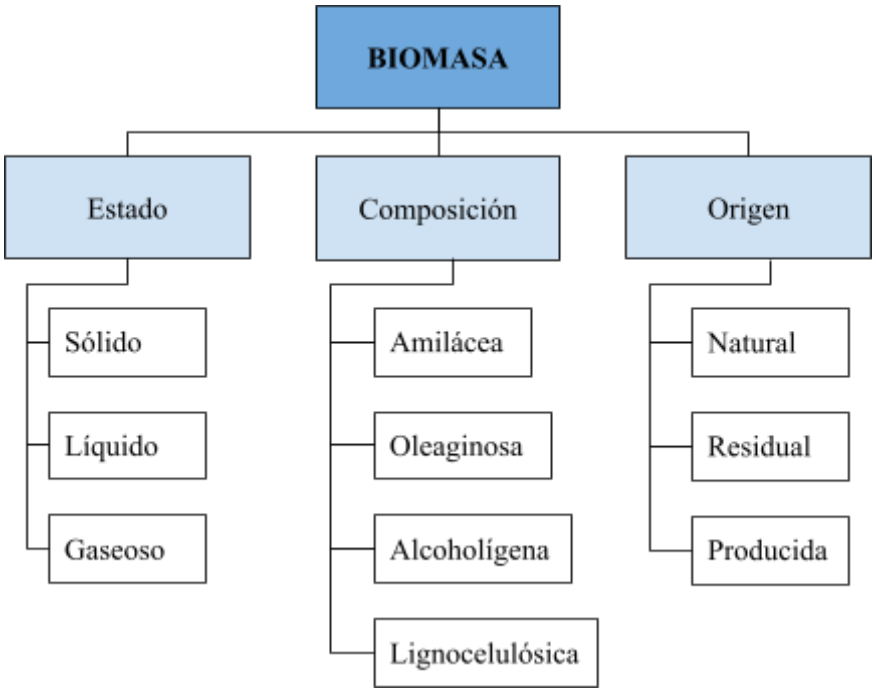

Figura 1. Clasificación de la biomasa (Fuente: Elaboración propia)

En la clasificación de la biomasa se tienen los constituidos por materiales lignocelulósicos, que se componen de tres constituyentes principales: celulosa, hemicelulosa y lignina (Wang et al., 2017). Cada tipo de biomasa posee estos componentes en concentraciones específicas que determinan su utilización en procesos de generación de energía, como la biomasa procedente de los bosques, los cultivos energéticos leñosos y los desechos y residuos industriales del sector forestal.

La Figura 2, presenta un esquema de las alternativas en los procesos de obtención, transporte y utilización de biomasa forestal para la generación de energía elaborado por la *Agencia Internacional de la Energía (IEA)*, en su publicación *Energy Technology Perspectives 2008*.

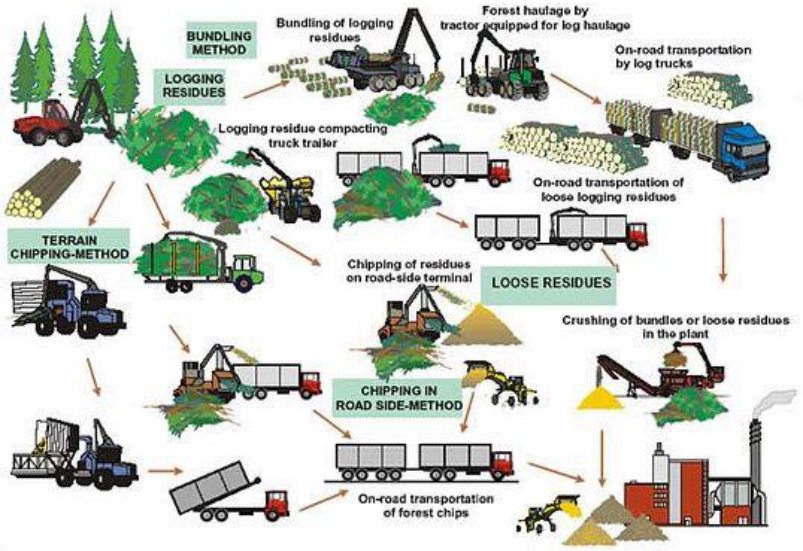

Figura 2. Esquema de cadena de combustible de biomasa forestal.

Fuente: Alakangas, VTT. Fig. 23.

La biomasa lignocelulósica, que incluye residuos forestales y desechos agrícolas, es la materia prima más común para la gasificación, un proceso termoquímico que convierte la biomasa sólida en un gas combustible. Esta biomasa tiene una importante aplicación en la generación de energía renovable debido a su disponibilidad y características energéticas (Moya, 2017). Al ser utilizada como fuente de energía, puede tener un impacto significativo en las emisiones atmosféricas. Se considera un combustible neutro desde el punto de vista del ciclo natural del carbono, ya que provienen del CO_2 absorbido previamente por las plantas y no introducen carbono adicional que altere el equilibrio de la concentración en la atmósfera. Por lo que se puede decir que contribuye de forma activa a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, esto en comparación con los combustibles fósiles tradicionales (Ayala-Mendivil et al., 2018).

3.2. Conversión Energética de Biomasa

La biomasa puede convertirse en energía mediante procesos bioquímicos y termoquímicos. Los procesos bioquímicos incluyen la fermentación, que produce bioetanol, y la digestión anaeróbica, que genera biogás. Entre los procesos termoquímicos destacan la combustión, la pirólisis y la gasificación.

- **Combustión**: Es el proceso más tradicional, en el cual la biomasa se quema en una atmósfera reactiva con aire, produciendo calor, gas carbónico, cenizas y agua. Se utiliza para calefacción o para la producción de energía eléctrica (Gómez, 2023)
- **Pirólisis**: La pirólisis consiste en la descomposición térmica de la biomasa en ausencia de oxígeno, a temperaturas de hasta 550°C. Se obtienen productos sólidos, líquidos y gaseosos, dependiendo de las condiciones de operación, como temperatura, presión y tiempo de residencia (San Segundo, 2024).
- **Gasificación**: Es un proceso termoquímico que convierte biomasa sólida en gas combustible mediante reacciones químicas. El gas resultante puede ser utilizado directamente como combustible o transformado en otros compuestos químicos. La

gasificación es eficiente en términos energéticos y es considerada un proceso limpio (Ayala-Mendivil, N et al., 2018).

La gasificación es un proceso de combustión limpia, con calentamiento homogéneo y fácil de controlar, que permite una eficiente recuperación de calor. La biomasa, como madera o residuos forestales, requiere acondicionamiento previo, como la trituración y el secado, para poder emplearse para gasificación. El proceso incluye cuatro zonas de reacciones químicas clave que deben ser controladas para optimizar la producción de gas (Sofán, 2022). Este sistema implica fenómenos complejos de transferencia de masa y energía, que abarcan desde el secado y desvolatilización del combustible hasta la oxidación de volátiles y carbón (Reyes et al., 2024). Un secado previo eficiente es esencial para reducir la demanda de calor y mejorar la estabilidad del proceso, minimizando el riesgo de emisiones nocivas.

3.2.1. Secado de sólidos

El secado se define como una operación unitaria que remueve parte de la humedad contenida dentro de una sustancia mediante la aplicación de una fuente de energía, que depende generalmente de las condiciones a las que se encuentra sometido el proceso (Geankoplis, 2006). El secado involucra procesos simultáneos de transferencia de energía y masa, se produce la transferencia de energía cuando el medio circundante transfiere calor al sólido con temperatura más baja que el medio. Este proceso de transporte da lugar a un aumento de la presión del vapor del sólido, superando la presión de vapor del gas. Como consecuencia, el gas extrae agua del sólido para lograr el equilibrio térmico. La remoción de agua en forma de vapor desde la superficie del sólido está determinada por factores externos como la temperatura, flujo y humedad del aire, el área expuesta del material y la presión, mientras que la migración del agua está influenciada por la composición fisicoquímica, el gradiente de temperatura y el contenido de humedad (Espinoza, 2011).

El secado es un proceso transversal a la gasificación, se realiza de forma forzada cuando la biomasa a utilizar presenta altos contenidos de humedad ($\geq$ 50%). La humedad trae como consecuencia combustible de baja calidad, reducción de rendimiento en la transformación, baja eficiencia en la generación de energía, formación de incrustaciones en los equipos o inestabilidad del proceso (Salinas, 2021). Durante el proceso de secado, la transferencia de masa depende de la temperatura de la materia prima, la tasa de transferencia de calor del entorno a la biomasa y la humedad relativa de la capa de gas circundante (Navidad, 2020).

Una de las tecnologías utilizadas para el secado de materiales granulados o particulados, como la biomasa forestal, es el secador continuo de lecho empacado, el cual es eficaz para secar astillas de madera hasta un contenido de humedad final de 10-20%. (Holmberg et al., 2014) Se caracteriza por tener un lecho fijo de material que se seca mientras el aire caliente fluye a través de él en dirección transversal. Dentro de los beneficios que tiene este tipo de secador se destaca la alta eficiencia energética, debido al control en la transferencia de calor y la distribución uniforme del aire caliente. Al ser un proceso continuo, permiten un

flujo constante de material, resaltando el efectivo manejo de materiales heterogéneos, lo que los hace adecuados para operaciones en la industria de pulpa y papel, donde son comúnmente utilizados para el secado de virutas, aserrín, astillas de madera y otros residuos forestales que se emplean para combustión o compactación en pellets.
La biomasa leñosa en forma de astillas o trozos, presenta un contenido de humedad del 50-60% dependiendo de la estación y tipo de madera. Reducir el contenido de humedad hasta alcanzar un 10% mediante el secado permite aumentar la eficiencia del proceso de gasificación, ya que disminuye la demanda de calor y optimiza el aprovechamiento del combustible. Como se mencionó anteriormente, el secador continuo de lecho es adecuado para el secado de biomasa, ya que aprovecha calor de baja temperatura, reduciendo el riesgo de incendios y emisiones contaminantes. En este tipo de secador, la biomasa se transporta en una cinta permeable mientras el medio de secado es impulsado por ventiladores a través del lecho, que puede tener una altura entre 2 y 30 cm. Se opera a temperaturas entre 60°C y 200 °C, lo que lo hace seguro y eficiente para recuperar el calor residual, minimizando la liberación de compuestos orgánicos volátiles (VOCs). (Alamia et al., 2015)

3.3. Programación Lineal

La programación lineal es un conjunto de técnicas racionales utilizadas para encontrar soluciones adecuadas a situaciones donde se deben tomar decisiones óptimas sujetas a ciertas restricciones. Se define como una herramienta matemática que permite formular modelos para resolver problemas de optimización, en los que se busca maximizar o minimizar una función objetivo, sujeta a un conjunto de restricciones lineales (Avalos, J. & Cepeda, P., 2024). Se caracteriza por ser un modelo fácil de generar y simple de resolver debido a la relación lineal entre variables, lo que permite automatizar el proceso de creación del modelo (Rodríguez, 2001)

Se conocen tres tipos de modelos: Modelo simbólico, modelo análogo y modelo físico. En el modelo simbólico todos los conceptos están representados por variables cuantitativas y las relaciones deben tener una representación matemática (Avalos, J. & Cepeda, P., 2024). Su aplicación se extiende desde la planificación de la producción hasta la gestión de la cadena de suministro y la toma de decisiones financieras.
De forma general, un modelo de programación lineal incluye los siguientes elementos (Bosio et al., 2023):

- Las variables de decisión, representan las cantidades desconocidas que deben determinarse para dar solución al problema
- Una función objetivo, de carácter lineal en cada una de las variables de interés y coeficientes que indican la contribución de cada variable al objetivo.
- Un conjunto de restricciones por limitación de recursos, representadas por expresiones lineales, son las condiciones que deben cumplirse para que la solución sea factible.
- Supuestos o condiciones adicionales que puedan surgir para dar solución al modelo.

La formulación y resolución de problemas con esta metodología generalmente debe seguir estos pasos:

- Identificar de forma clara el problema a resolver y establecer los objetivos que se desean alcanzar con base en los parámetros propuestos.
- Seleccionar las variables de decisión que afectan el problema y asignarles su respectivo nombre y notación.
- Formular el problema como un modelo matemático, definiendo la función lineal que represente el objetivo y las restricciones que limitan las posibles soluciones al problema.
- Utilizar métodos analíticos o software especializado para resolver el modelo y encontrar la solución óptima.
- Analizar y validar los resultados obtenidos, interpretando su significado en el contexto real del problema.

En la Figura 3 se muestra el esquema de las principales actividades para el desarrollo de un modelo previo a su aplicación.

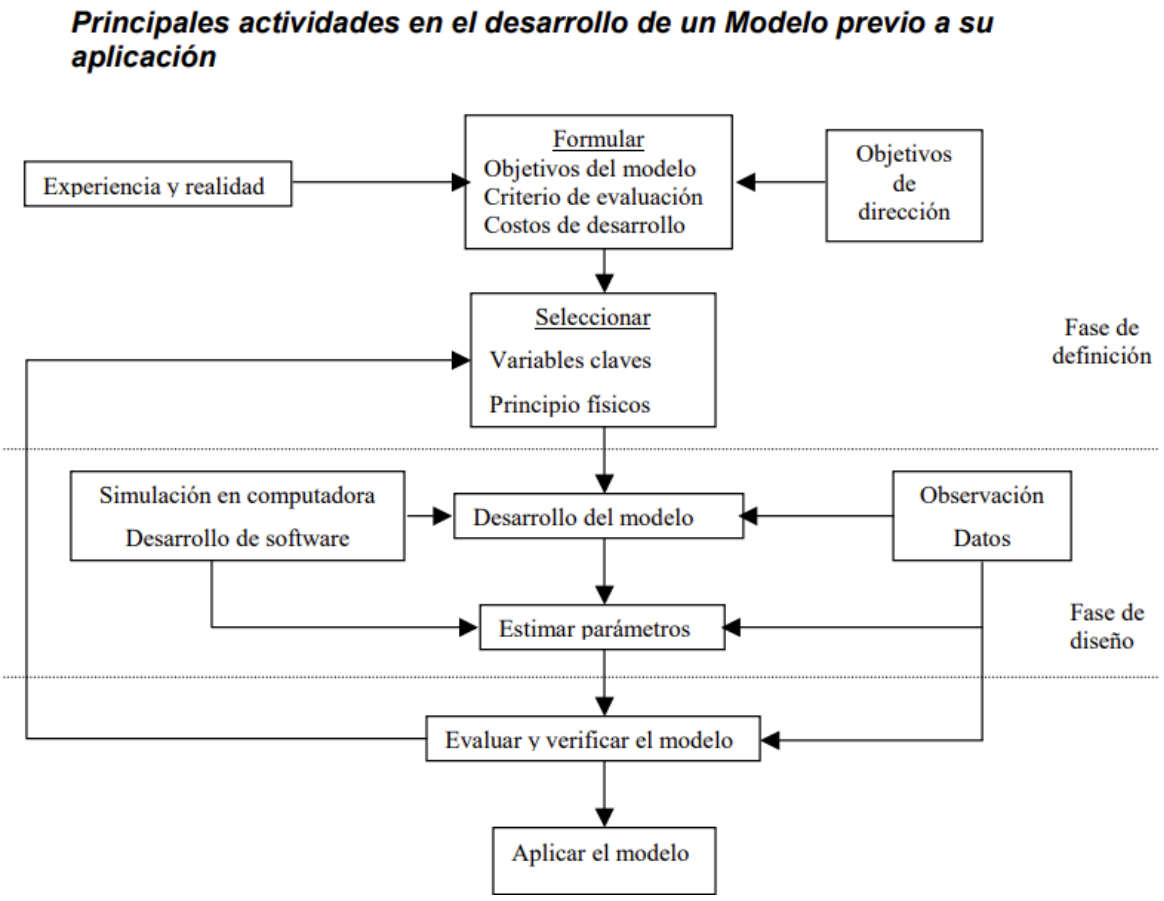

Figura 3. Esquema de actividades para el desarrollo de un modelo.

Fuente: Rodríguez, 2001. Fig. 5.

4. ANTECEDENTES

El uso de herramientas de modelación matemática disminuye la necesidad de realizar procedimientos experimentales que conllevan riesgos de operación, altos costos y tiempo (Yan et al., 2018). A nivel global se han adelantado investigaciones en las que se incorporan técnicas de programación lineal para el estudio de procesos que involucran la biomasa. Lee, M y Kim, J, (2017) utilizaron un modelo de programación lineal entera mixta para identificar una forma rentable y eficiente de desarrollar el sistema de suministro de energía basado en biomasa como materia prima. En esta investigación se formularon dos modelos de optimización, un modelo base para la identificación de la estrategia óptima junto con alternativas para la utilización de biomasa y el análisis de los factores de costo y contribución de las estrategias; y otro modelo para evaluar la viabilidad del sistema de suministro de energía impulsado por biomasa. Las estrategias óptimas obtenidas para tecnologías de conversión termoquímica fueron aquellas que tienen como producto final combustibles líquidos, las estrategias que utilizan biomasa forestal muestran mejores resultados económicos en comparación con especies herbáceas con un costo nivelado de la energía (LCOE) de 86 USD$/MWh.

Radics, Dasmohapatra & Kelley, (2016) utilizaron la programación lineal para estudiar los impactos sociales, ambientales y económicos del uso de biomasa forestal para la producción de bioenergía. Plantearon dieciséis escenarios posibles con las combinaciones de materias primas, productos, mercados y usos finales. El modelo desarrollado mostró que económicamente la mejor solución era utilizar un 70% de madera en rollo y un 30% de residuos forestales como materia prima para producir pellets de material torrefactado destinados a la calefacción urbana en la Unión Europea.

Rahma et al, (2024) llevaron a cabo un estudio sobre la optimización del flujo de suministro en un sistema de coignición, con el objetivo de reducir el impacto del calentamiento global. El análisis se centró en racimos vacíos de fruta de palma de aceite, procesados en forma de pellets para su uso en plantas de energía. Utilizando programación lineal, optimizaron la reducción del impacto ambiental derivado de la combustión conjunta de carbón y pellets. Los resultados revelaron que la construcción de seis plantas de producción de pellets permitirá sustituir hasta el 1% del suministro de carbón en cinco centrales eléctricas. Esta medida logra una disminución en las emisiones de 0.018 kg CO2 eq/kWh, equivalente a una reducción anual del 1.57%.

En Colombia, De la rosa, L (2023) desarrolló una herramienta de modelamiento de programación lineal para la evaluación de alternativas de aprovechamiento energético de biomasa, la cual permitió identificar las rutas óptimas de aprovechamiento de las biomasas estudiadas, teniendo en cuenta parámetros fisicoquímicos, técnicos y económicos. Los resultados mostraron que la mejor configuración fue que las biomasas de arroz, maíz, caña, café y bovino fueran procesadas en las tecnologías de pirólisis, gasificación, combustión, digestión y fermentación, respectivamente, para obtener USD$ 400 millones en términos de maximización de utilidad.

Actualmente, se cuenta con pocas referencias respecto al modelado del proceso de secado de biomasa. Holmberg, H & Ahtila, P (2005) enfocaron sus estudios en crear un modelo de cálculo capaz de determinar la humedad final del combustible, la temperatura de secado y el grado de eficiencia energética de un secador continuo de flujo cruzado. Para realizar los cálculos del modelo tuvieron en cuenta las fuentes de calor más adecuadas en las fábricas de pulpa y papel, los precios de la energía y una vida útil de 10 años con una tasa de interés del 5%. Los resultados indican que el secador optimizado utiliza solo calor secundario para calentar el aire de secado, con dos etapas y una humedad final del flujo de combustible/ corteza del orden de 0.3 kg/kg_{dm}

Gebreegziabher et al (2013) utilizaron un modelo matemático de un proceso de secado de astillas de madera para optimizar el diseño y operación del proceso. Para el modelo se tuvieron en cuenta los balances de materia y energía de las unidades individuales. Las soluciones óptimas mostraron que el tamaño de las astillas de madera afecta fuertemente en los costos; si el tamaño de las astillas es demasiado grande, el tiempo de secado se prolonga, lo que aumenta significativamente el tamaño del secador y el costo de energía.

5. METODOLOGÍA

Para iniciar con el desarrollo del modelo de programación, se planteó una metodología estructurada que abarca desde la definición del proceso de estudio hasta el análisis de resultados. En el esquema presentado en la Figura 4 se resumen las principales etapas llevadas a cabo para la consecución del proyecto. Este enfoque permitió asegurar una solución eficiente y fundamentada al problema planteado, tal como se describe en los apartados siguientes.

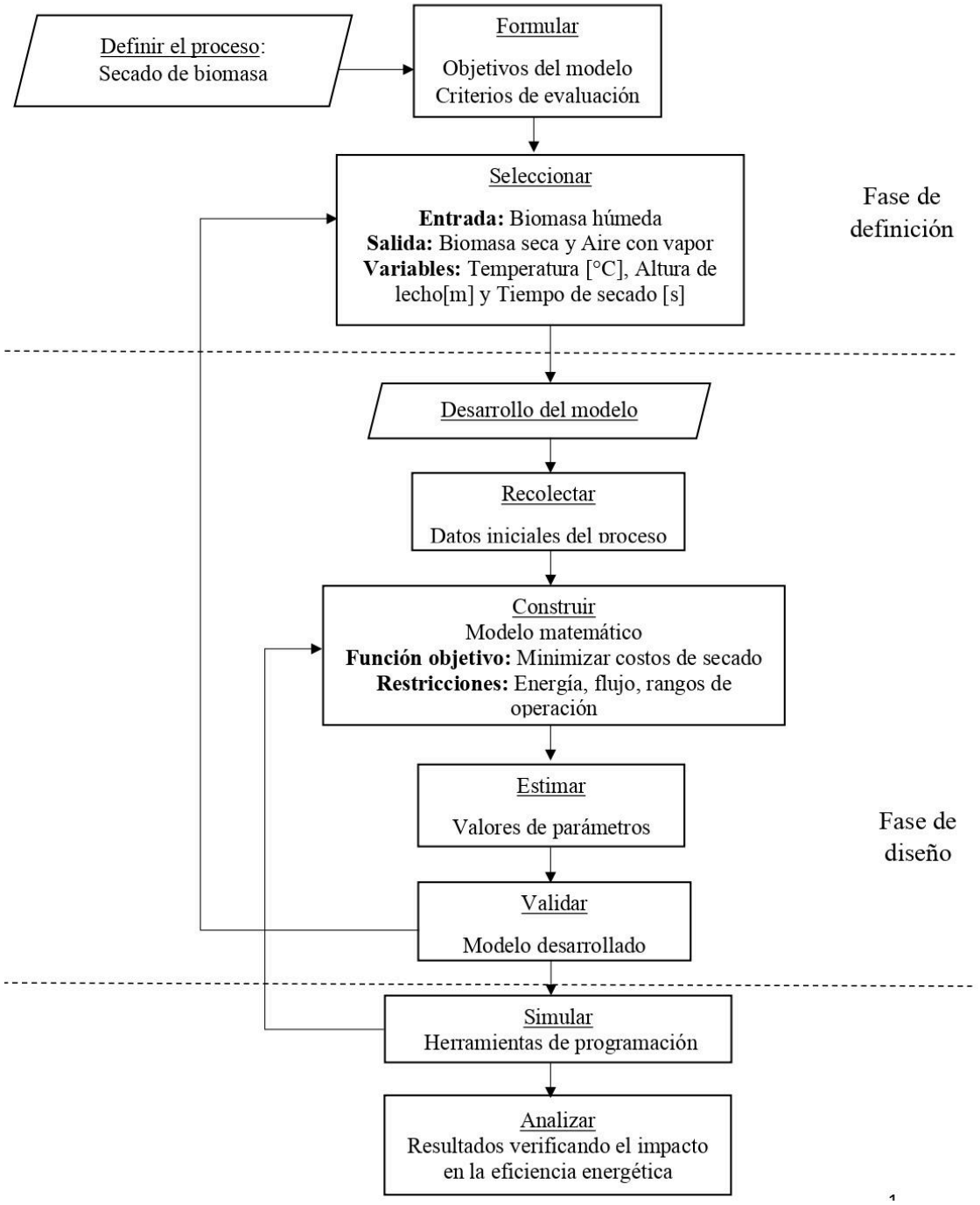

Figura 4. Metodología para el desarrollo del modelo de minimización de costos de secado.

5.1. Definición del equipo para la aplicación de programación lineal

Para este estudio se definió un secador continuo de lecho empacado el cual resulta adecuado para secar biomasa, en este caso proveniente de residuos forestales. El equipo en mención está compuesto por una cinta transportadora perforada que permite el paso de aire caliente a través del lecho de biomasa. Consta de una sección de secado, que puede utilizar diferentes fuentes de calor, como agua caliente, vapor a contrapresión o calor residual. Las dimensiones del secador, incluidas las áreas de transferencia de calor y las características de flujo de aire, se establecen basándose en curvas de secado que se han obtenido de la literatura para el material procesado. El flujo de aire se puede dirigir de forma ascendente o descendente en diferentes secciones del secador. El control de variables como la velocidad de flujo y la temperatura del aire permite gestionar el tiempo de secado y alcanzar el contenido de humedad deseado (oscila entre 10% - 20%, dependiendo de la tecnología de conversión energética).

Para el análisis se seleccionaron dos variables clave que impactan directamente en el proceso de secado de biomasa forestal: la temperatura del aire de secado y la altura del lecho de biomasa. Las variables fueron escogidas debido a su influencia directa en la eficiencia del proceso de secado. La temperatura del aire afecta la rapidez con la que el agua se evapora de la biomasa, permitiendo que el secado ocurra a una velocidad mayor. Esto facilita el control del proceso y permite ajustar las condiciones según las necesidades del secado. Por otra parte, la altura del lecho de biomasa fue seleccionada porque influye en la cantidad de biomasa que puede secarse en cada ciclo y en la distribución del flujo de aire caliente. Un lecho más alto permite procesar más biomasa, pero también puede afectar la uniformidad del secado, por lo que es fundamental encontrar el punto óptimo que permita una buena circulación del aire sin comprometer la eficiencia.

Es importante resaltar que la velocidad del aire es un factor esencial en el proceso de secado de biomasa, dado que afecta la tasa de transferencia de calor entre el aire y la biomasa. Un incremento en la velocidad del aire puede elevar el consumo energético y provocar una disminución en la eficiencia térmica si no se controla correctamente. Holmberg y Athila (2004) indicaron que la velocidad del aire está inversamente relacionada con el área transversal del secador, lo que significa que un aumento en la velocidad permite reducir las dimensiones del equipo, y por ende, los costos de inversión. Considerando que investigaciones anteriores han realizado análisis de sensibilidad en esta variable y han establecido valores ideales de operación, en este estudio se decidió mantener la velocidad del aire constante en 0.7 m/s, un valor sugerido en la literatura para el secado de astillas de madera y que está dentro de los rangos operacionales definidos en investigaciones previas.

La Figura 5. Muestra un ejemplo de un secador continuo de lecho empacado, en el que las astillas o trozos de madera húmedas se introducen por uno de los laterales sobre la banda transportadora, la cual se mueve en el área de secado y cuenta con una cinta perforada o de malla que permite el paso de aire caliente. El aire de secado calienta el material y evapora

la húmedad. También, absorbe parte de esa humedad evaporada, emergiendo así como aire húmedo del secador.

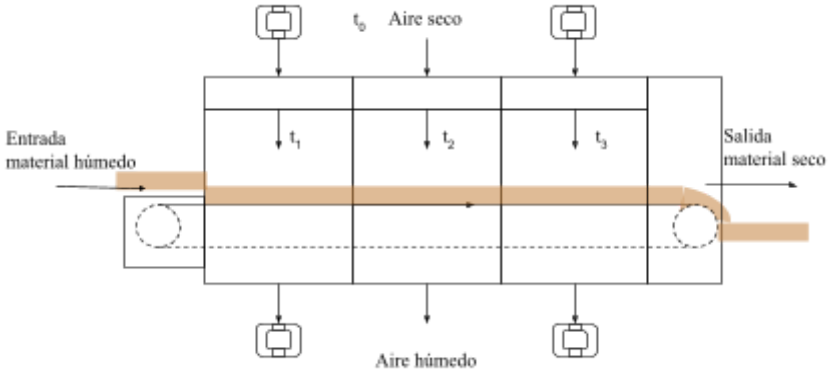

Figura 5. Esquema de un secador de lecho continuo.

5.2. Desarrollo del modelo

Los costos totales de secado se determinaron utilizando la Ecuación 1:

$$C_{tot} = fa \cdot C_{cap} + C_{ope} \quad (1)$$

En donde C_{cap} son los costos totales de inversión de la configuración del secador [USD], C_{ope} son los costos de operación [USD] y el término fa es el factor de anualidad, para este caso fue calculado siguiendo la Ecuación 2:

$$fa = \frac{\frac{i}{100}}{\left[1-\left(1+\frac{i}{100}\right)^{-n}\right]} \quad (2)$$

Myllymaa, T et al., (2018) desarrollaron la Ecuación 3 para calcular los costos de inversión basados en los costos obtenidos de los fabricantes de secadores: Stela, Andritz y Swiss Combi, en esta se incluyen los costos del secador, los intercambiadores de calor y ventiladores utilizados en la configuración. Es importante tener en cuenta que, la ecuación es exacta cuando el área de sección transversal se encuentra en un rango de 0 - 480 m^2.

$$C_{cap} = A_{sec} \cdot \left[-\ 3095 \ln\left(\frac{A_{sec}}{480}\right) + \ 5838\right] \quad (3)$$

Cuando se conoce el tiempo de secado, el área de la sección transversal del secador (A_{sec}) [m^2] se puede definir como en la Ecuación 4:

$$A_{sec} = \frac{\dot{m}_{bs}\tau}{\rho_{bs} Z} \quad (4)$$

Donde $\dot{m}_{bs}$ es el flujo másico del material en base seca [kg/s], ρ_{bs} es la densidad aparente del material en base seca [kg/m^3], Z es la altura del lecho [m] y τ Es el tiempo de residencia del material dentro del secador [s]. El tiempo de secado se calcula utilizando una curva de secado característica para el tipo de biomasa, estos datos son medidos de forma experimental en función del cambio de masa y se puede encontrar más detalle sobre esto en la literatura (Myllymaa et al., 2014)

Los costos operacionales se expresan en la Ecuación 5:

$$C_{ope} = \lambda(C_{elec} P_{elec} + \varphi_i C_{calor}) \quad (5)$$

Donde C_{elec} es el precio de la electricidad [USD/kWh], $C_{calor,i}$ es el precio del calor [USD/kWh] que depende del precio de la fuente de calor utilizada, es decir, si es agua caliente, vapor o la combinación de ambas, φ_i Consumo de calor del secador [MW], λ Tiempo de funcionamiento anual del secador [h] y P_{elec} Consumo de electricidad de los ventiladores [MW], el cual se calculó con la Ecuación 6.

$$P_{elec} = \frac{v \cdot A_{sec} \cdot \Delta P_{pres}}{\eta_{ven}} \quad (6)$$

Donde ΔP_{pres} Caída de presión en el secador [Pa], v velocidad del aire en la entrada de los ventiladores [m/s] y η_{ven} eficiencia de los ventiladores.
El consumo de calor se determinó con la Ecuación 7

$$\varphi_i = \dot{m}_{as}\left(h_{salida} - h_{entrada}\right) \quad (7)$$

Sabiendo que el flujo másico para el aire seco ($\dot{m}_{as}$, kg/s) se define en la Ecuación 8:

$$\dot{m}_{as} = vA_{sec}\delta_{as} \quad (8)$$

La Ecuación 7. Se puede reescribir como:

$$\varphi_i = vA_{sec}\delta_{as} \cdot \left(h_{salida} - h_{entrada}\right)$$

Donde h es la entalpía de la humedad del aire en la entrada y salida del intercambiador de calor [kJ/kg]. La densidad del aire seco δ_{as} se calculó asumiendo la ecuación de gas ideal. Para calcular la entalpía de la humedad del aire se utilizó la ecuación 9.

$$h = x\left(c_{p,v} \cdot T + 2501\right) + c_{p,as} \cdot T \quad (9)$$

Donde $c_{p,v}$ es la capacidad calorífica del vapor [kJ/kg °C], $c_{p,as}$ es la capacidad calorífica del aire seco [kJ/kg °C], T es la temperatura del aire [°C] y x es el contenido de humedad del aire [kg $_{agua}$ / kg$_{as}$]
La eficiencia térmica se determinó mediante la Ecuación 10.

$$n_{ter} = \frac{Q_{util}}{Q_{total}} \quad (10)$$

Sabiendo que Q_{util} [kJ] es el calor necesario para evaporar la humedad de la biomasa, se definió la Ecuación 11.

$$Q_{util} = \dot{m}_w \Delta H_v \quad (11)$$

Donde $\dot{m}_w$ [kg] es la cantidad de agua evaporada y ΔH_v[kJ/kg] es el calor latente de vaporización.
A partir de las consideraciones de costos y ecuaciones previamente discutidas, se planteó el modelo de optimización cuyo objetivo es minimizar los costos totales del proceso de secado variando la altura del lecho Z y la temperatura del aire de secado T. La función objetivo para la resolución del modelo se definió en la Ecuación 12.

Función objetivo

$$Min\ Costo\ total = fa \cdot A_{sec}\left[-\ 3095 \ln\left(\frac{A_{sec}}{480}\right) + 5838\right] + \lambda\,(C_{elec}\ \frac{v \cdot A_{sec} \cdot \Delta P_{pres}}{\eta_{ven}} + \ vA_{sec}\delta_{as} \cdot \left(h_{salida} - h_{entrada}\right) \cdot C_{calor,i}) \quad (12)$$

La función objetivo en el modelo está compuesta por los costos operativos asociados al proceso, que incluyen principalmente los costos de electricidad, los costos de calor y los costos de inversión.
La Ecuación 12, finalmente queda expresada por los términos fa factor de anualidad, A_{sec} área de la sección transversal del secador [m^2], λ Tiempo de funcionamiento anual del secador [h], C_{elec} es el precio de la electricidad [USD/kWh], v velocidad del aire en la entrada de los ventiladores [m/s], ΔP_{pres} Caída de presión en el secador [Pa], η_{ven} eficiencia de los ventiladores, δ_{as} densidad del aire seco y $C_{calor,i}$ es el precio del calor [USD/kWh].

Restricciones

- Para garantizar la viabilidad técnica del sistema, el área de la sección transversal debe estar comprendida entre 0 y 480 m^2, ya que este valor representa el tamaño máximo que puede ser fabricado por los principales proveedores de secadores industriales

(Myllymaa et al., 2018). Esta limitación asegura que el diseño del equipo sea compatible con las capacidades de fabricación de los proveedores, permitiendo la implementación práctica del sistema propuesto.

$$A_{sec} \leq 480\, m^2$$

- Se establece que la eficiencia térmica del secador debe ser superior al 70% para asegurar que el sistema opere con un rendimiento energético óptimo, equilibrando el consumo de energía y la transferencia de calor dentro de los parámetros industriales.

$$n_{ter} \geq 0.7$$

- Para la evaluación de las variables del sistema, se estableció un rango para la temperatura de secado comprendido entre 30°C y 90°C, ya que representan el intervalo más comúnmente utilizado en procesos de secado de biomasa (Myllymaa et al., 2018) donde no se ve comprometido la calidad del producto ni genera un consumo energético excesivo. Por otro lado, la altura del lecho se evalúa dentro del rango de 0.1 m a 0.5 m, para garantizar que el área de la sección transversal no exceda su límite máximo.

La herramienta MATLAB se utilizó para evaluar el modelo desarrollado debido a su capacidad para resolver problemas de programación lineal mediante funciones avanzadas de optimización numérica (Lee & Kim, 2017). Su uso en investigaciones anteriores relacionadas con procesos térmicos ha evidenciado su exactitud al solucionar modelos basados en ecuaciones diferenciales y al llevar a cabo análisis de sensibilidad (Yan et al., 2018). Además, MATLAB dispone de solvers especializados que facilitan la determinación de los parámetros para minimizar o maximizar una función objetivo, garantizando el cumplimiento de de las restricciones establecidas en el modelo. Es importante mencionar que la Universidad del Valle cuenta con la licencia institucional para la utilización del software.

5.3. Caso de estudio

El sistema analizado cuenta con una fuente de calor disponible para calentar el aire de secado. La Figura 6, presenta cómo el calor se transfiere primero al fluido de circulación, y luego el fluido calienta el aire de secado. Este es un esquema de calentamiento típico en procesos industriales donde se conocen la temperatura de la fuente de calor y del aire de suministro antes del calentamiento (Holmberg et al., 2014) .

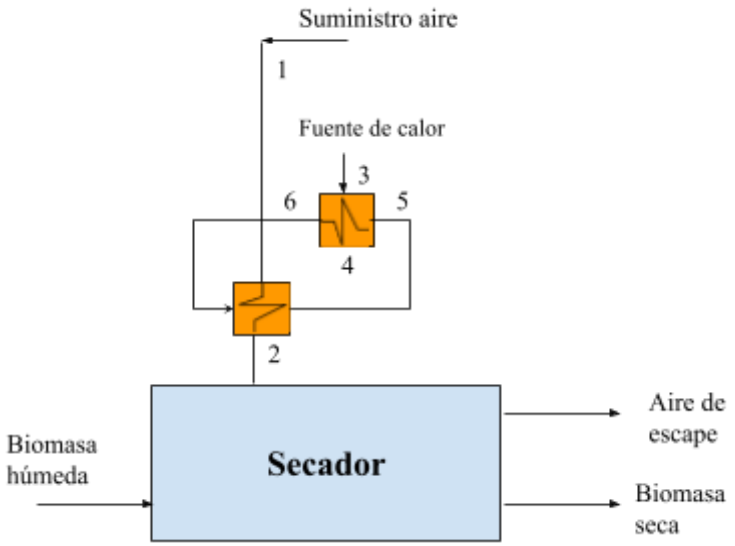

Figura 6. Descripción de la configuración de secado.

Antes de definir los parámetros utilizados en la modelación, se realizó una revisión detallada de múltiples fuentes científicas con el objetivo de determinar rangos de operación coherentes y alineados con estudios previos sobre el secado de biomasa en secadores de lecho empacado (Myllymaa et al., 2018; Holmberg et al., 2014). Este análisis permitió establecer valores de referencia fundamentados en investigaciones publicadas y la clasificación proporcionada en curvas de secado reportadas para el tipo de biomasa, garantizando la coherencia de los criterios aplicados. Los valores de los parámetros utilizados en todo el sistema de secado se muestran a continuación en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros del proceso.

Parámetro	Valor	Unidades
Temperatura del aire de suministro	15	°C
Calor específico del aire seco	1.005	kJ/kg°C
Densidad del aire	1.2	kg/m^3
Velocidad del aire	0.7	m/s
Capacidad calorífica del vapor	1.86	kJ/kg°C
Caída de presión del sistema	300	Pa
Eficiencia del ventilador	0.8	
Flujo másico de biomasa seca	0.732	kg_{bs}/s
Densidad aparente de la biomasa	143	kg/m^3
Contenido de húmedad inicial biomasa	1.3	kg_w/kg_{bs}
Contenido de húmedad final biomasa	0.2	kg_w/kg_{bs}
Contenido de húmedad del aire	0.004	kg_w/kg_{as}

Calor latente de vaporización	2,501	kJ/kg
Precio del calor	8	USD/MWh
Precio de la electricidad	37	USD/MWh
Tiempo de funcionamiento anual del secador	8,000	h/a
Tasa de interés anual	5	%
Vida útil del secador	20	años

6. RESULTADOS Y ANÁLISIS

El modelo de programación desarrollado para la reducción de costos de secado de biomasa se evaluó utilizando la herramienta MATLAB. El caso de estudio buscaba analizar el impacto de la variación de la altura del lecho y la temperatura del aire en los costos totales de un secador operado con astillas de madera. Para la evaluación se supone una vida útil de 20 años con un funcionamiento anual de 8000 h. Además, se estableció el precio de la electricidad 37 USD$/MWh y el calor 8 USD$/MWh para una planta ubicada en el Valle del Cauca.

Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 7, ventana generada en MATLAB, donde se evidencia la combinación de las variables estudiadas junto con los costos calculados tras la optimización. Para garantizar la precisión y confiabilidad de la solución obtenida en el modelo matemático, se verificó la convergencia asegurando que el solver alcanzara una solución dentro de los límites de tolerancia, confirmando así que el modelo no presentaba divergencia en sus interacciones. Además, se analizaron los valores de las variables de decisión y las restricciones para comprobar que las condiciones eran acordes.

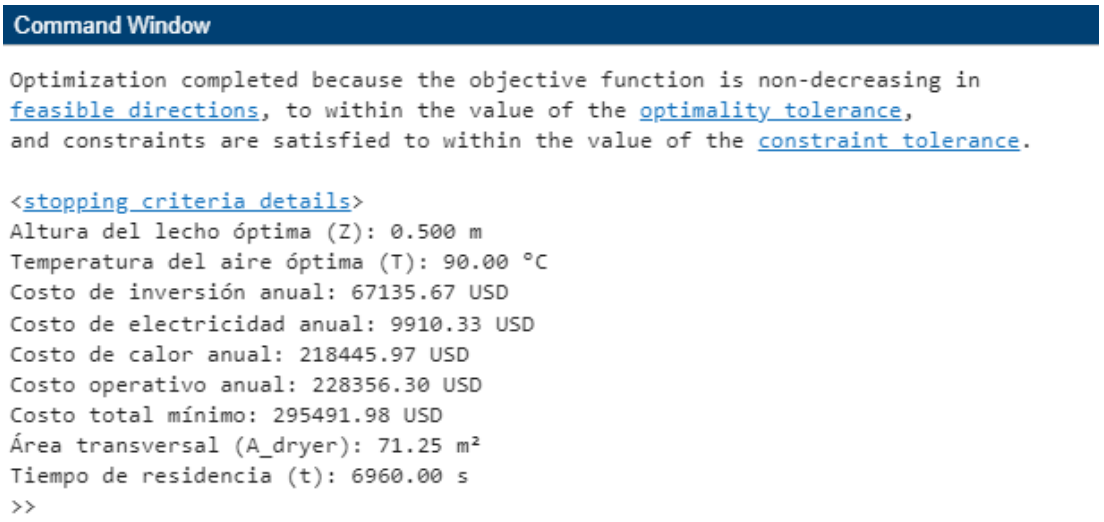

Figura 7. Resultados de la optimización del modelo.

6.1 Análisis de escenarios

Para evaluar la eficiencia del proceso de secado de biomasa forestal y su impacto en los costos operativos, se realizó un análisis de escenarios basado en la variación de las principales parámetros de operación: temperatura del aire, altura del lecho y tiempo de secado. Estas variables fueron seleccionadas debido a su influencia en la eficiencia térmica y en la viabilidad económica del proceso. Se llevaron a cabo simulaciones dentro de los rangos operativos establecidos, manteniendo constantes las demás condiciones para determinar su influencia en el proceso y poder identificar las combinaciones que minimicen los costos totales del secado.

La Tabla 2, resume los resultados obtenidos de los diferentes escenarios analizados, mostrando el impacto de las variables clave en los costos operacionales y totales.

Tabla 2. Análisis de costos en función de temperatura y altura de lecho.

Temperatura del aire	Altura del lecho [m]	Tiempo de secado [s]	Área transversal [m2]	Costo de inversión anual [USD]	Costo de electricidad [USD]	Costo de calor [USD]	Costo operativo anual [USD]	Costo Total [USD]
30 °C	0.1	9,370	479.6	$ 224,779.5	$ 66,709.7	$ 294,086.0	$ 360,795.7	$ 585,575.2
	0.3	18,450	314.8	$ 180,454.1	$ 43,784.9	$ 193,023.4	$ 236,808.3	$ 417,262.4
	0.5	28,010	286.8	$ 171,021.2	$ 39,883.4	$ 175,823.9	$ 215,707.3	$ 386,728.5
50 °C	0.1	6,910	353.7	$ 192,518.6	$ 49,195.7	$ 506,045.6	$ 555,241.3	$ 747,759.9
	0.3	14,320	244.3	$ 155,437.1	$ 33,983.7	$ 349,569.4	$ 383,553.1	$ 538,990.2
	0.5	19,460	199.2	$ 136,837.3	$ 27,709.1	$ 285,026.0	$ 312,735.0	$ 449,572.3
90 °C	0.1	3,250	166.4	$ 121,713.5	$ 23,138.4	$ 510,021.1	$ 533,159.5	$ 654,873.0
	0.3	5,240	89.4	$ 79,201.3	$ 12,435.4	$ 274,103.7	$ 286,539.0	$ 365,740.4
	0.5	6,960	71.3	$ 67,135.7	$ 9,910.3	$ 218,446.0	$ 228,356.3	$ 295,492.0

La configuración obtenida mediante programación lineal indicó que la mejor combinación para minimizar los costos es operar el secador a una temperatura de 90°C y una altura de lecho de 0.5 m. Esta combinación reduce significativamente los tiempos de secado, lo que, a su vez, disminuye los costos asociados al consumo de electricidad y al área de secado necesaria. El costo total en este escenario fue de 295,491.97 USD anuales, distribuidos en 67,135.67 USD de inversión anual, 9,910.33 USD en costos de electricidad y 218,445.97 USD en costos de calor.

Al operar a temperaturas más altas, como en este caso a 90°C, el secado se completa más rápidamente, lo que significa que el tiempo de residencia del material dentro del secador es menor. Esto se traduce en una reducción del consumo de electricidad, ya que el ventilador y los otros componentes del sistema trabajan durante menos tiempo. Además, la altura del lecho de 0.5 m permitió mantener una alta eficiencia en la transferencia de calor, minimizando la evaporación del agua contenida en la biomasa.

6.1.1 Análisis de escenarios con variaciones en temperatura y altura de lecho

Escenario 1: ***Temperatura Constante de 50°C***
Cuando la temperatura se fija en 50°C y se varía la altura del lecho de 0.1m a 0.5 m, se observa que el tiempo de secado aumenta considerablemente, llegando a un máximo de

19,460 segundos para una altura de 0.5 m. Este comportamiento se debe a que al aumentar la altura del lecho, se incrementa la cantidad de biomasa a secar por unidad de área, lo que hace más lenta la transferencia de calor y aumenta el tiempo de residencia.

Siguiendo la Ecuación 4, cuando se aumenta el tiempo de residencia y la altura del lecho se obtiene una reducción del área transversal, lo que implica una reducción tanto en los costos de inversión como en los costos de electricidad debido a que un secador más compacto requiere menos energía para operar los ventiladores. Sin embargo, aunque los costos de calor son menores siguen siendo significativos, alcanzando $28,5026 USD en el caso de 0.5 m de altura, lo que sugiere que la reducción en costos de inversión no es suficiente para compensar el alto consumo de energía.

Escenario 2: ***Altura Constante de 0.3 m***
Manteniendo la altura del lecho en 0.3 m y variando la temperatura de 30°C a 90°C, se observa una tendencia inversa en el tiempo de secado y los costos. A temperaturas más bajas (30°C), el proceso de secado es extremadamente ineficiente, alcanzando tiempos de hasta 18,450 segundos. Esta ineficiencia se debe a la menor cantidad de energía disponible para evaporar el agua contenida en la biomasa, lo que prolonga el tiempo necesario para alcanzar el contenido de humedad objetivo. En este escenario, se requiere un área transversal mayor para compensar la menor tasa de evaporación, lo que incrementa los costos de inversión y de electricidad debido a la necesidad de mantener el sistema operando durante más tiempo.

Por el contrario, al operar a 90°C, el tiempo de secado se reduce a 5,240 segundos, lo que permite una disminución significativa en los costos totales. Esto se debe a que el aumento de la temperatura del aire mejora la eficiencia térmica del proceso de secado, ya que incrementa el gradiente de temperatura entre el aire caliente y la biomasa, favoreciendo una mayor transferencia de calor y aumentando la tasa de evaporación, lo que permite un proceso más rápido y eficiente. Esta condición no solo minimiza el tiempo operativo, sino que también reduce el consumo energético y los costos del proceso. El análisis confirma los resultados obtenidos en el modelo desarrollado, demostrando que operar a temperaturas más bajas no es económicamente viable y para maximizar la eficiencia térmica y minimizar los costos del proceso se debe operar en un rango cercano a 90°C.

En la Figura 8. Se presenta el comportamiento de los costos totales en función de la temperatura y la altura del lecho. Se puede observar los escenarios evaluados de manera clara, permitiendo una comparación visual entre las diferentes combinaciones. Los colores representan las zonas con diferentes valores de costos, donde las zonas rojas indican costos más altos y las zonas azules muestran los costos más bajos. En la Tabla 2, se incluye un desglose detallado de los resultados obtenidos para diferentes escenarios que complementan y facilitan la interpretación de los valores específicos.

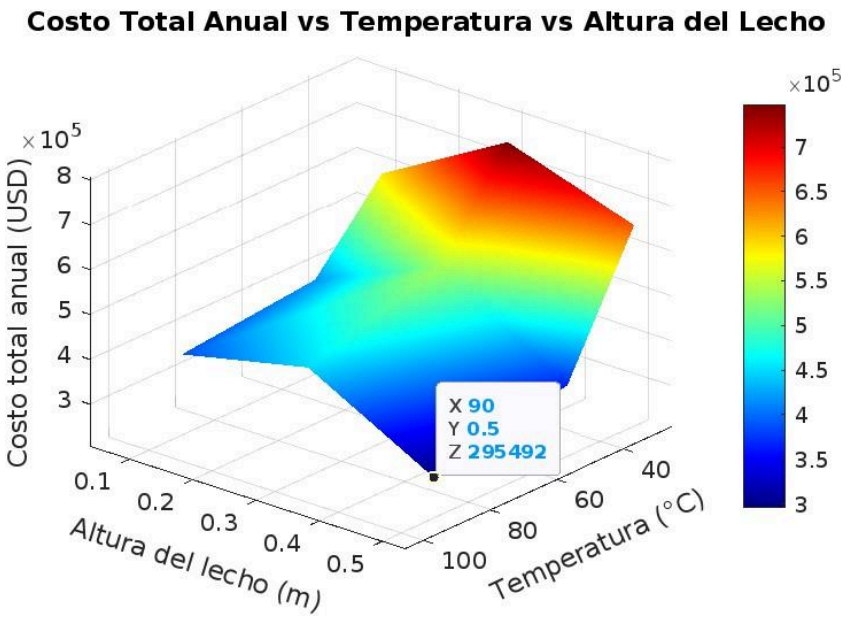

Figura 8. Gráfico para el efecto de las variables del modelo sobre los costos totales.

El gráfico permite identificar las combinaciones más eficientes de estas variables, en términos de costos. Se observa que los costos totales disminuyen considerablemente a medida que aumenta la temperatura del aire. Esto es consistente con la lógica del proceso, ya que temperaturas más altas permiten reducir el tiempo de secado, lo que impacta positivamente en la reducción de los costos operacionales, especialmente los relacionados con la electricidad. Sin embargo, es importante destacar que operar a temperaturas muy altas podría tener limitaciones técnicas y económicas, como la degradación del material y el aumento del riesgo de fugas de calor, lo que afectaría la sostenibilidad a largo plazo del proceso.

Se observa que, al incrementar la altura del lecho, el costo de inversión disminuye debido a un menor requerimiento de área transversal. Sin embargo, esto conlleva un aumento en los costos operacionales, ya que al tener una mayor profundidad se genera una mayor resistencia al flujo de aire, lo que incrementa la demanda de energía para forzar el aire caliente a través del material. La altura del lecho es un factor importante en el diseño de secadores de biomasa, su modificación genera cambios en la dinámica del secado que requieren ajustes en otros parámetros, como la temperatura del aire y el tiempo de secado, para mantener o mejorar la eficiencia del proceso. Una mayor altura del lecho aumenta la resistencia al paso del aire, lo que puede reducir la transferencia de calor por convección debido al menor contacto del aire caliente en las capas inferiores del material.

Para contrarrestar los efectos negativos de un aumento en la altura del lecho y alcanzar el contenido de humedad deseado, se pueden realizar unos ajustes, ya sea aumentando la temperatura del aire para incrementar el gradiente térmico, mejorando así la transferencia de calor para compensar la menor eficiencia causada por la resistencia al flujo del aire. Sin embargo, es crucial controlar la temperatura para evitar daños o pérdidas de calidad en la

biomasa. Otra estrategia es prolongar el tiempo de secado, esto permite una distribución más uniforme del calor dentro del lecho, asegurando que todas las capas del material alcancen el contenido de humedad deseado. No obstante, tiempos de secado excesivamente largos pueden reducir la capacidad de producción y aumentar los costos operativos.

6.2 Estrategías para mejorar la eficiencia operativa

Con base en los resultados obtenidos, es fundamental implementar estrategias operativas para la reducción de costos. Una de las estrategias clave consiste en optimizar la eficiencia térmica del secador mediante la integración de un sistema de recuperación de calor residual. Esto puede requerir la instalación de intercambiadores de calor, los cuales captan el calor del aire caliente de salida y lo reutilizan para precalentar el aire de entrada, lo que en términos prácticos, ayudaría a disminuir el consumo de energía.

Otra estrategia es el ajuste dinámico de la velocidad del aire en función de la humedad residual de la biomasa. Esto sugiere implementar sensores de húmedad distribuidos en diferentes puntos del secador, que permiten monitorear el contenido de húmedad en tiempo real. Con esta información, un control automático ajusta la velocidad del ventilador: en las primeras etapas, cuando la humedad es alta, se usa mayor velocidad, y en las últimas, donde el material está casi seco, se reduce para ahorrar energía, adaptándose a las condiciones de secado en cada sección del lecho. Esto tendría un impacto directo en los costos operacionales, al disminuir el consumo de electricidad de los ventiladores y evitar el secado excesivo del material, lo que también puede mejorar la calidad final del producto.

Por otro lado, es fundamental la selección adecuada de la temperatura de operación. Si bien operar a temperaturas elevadas reduce el tiempo de secado, se debe evitar temperaturas excesivas que puedan generar un sobreconsumo energético o la degradación térmica del material. Se plantea la posibilidad de integrar sistemas de control térmico, que ajustan la temperatura de manera precisa según las características del material que se esté procesando.

Finalmente, se sugiere realizar simulaciones de CFD (dinámica de fluidos computacional) para evaluar la distribución del aire y calor dentro del secador. Estas simulaciones pueden ofrecer una visión detallada de posibles ineficiencias en el diseño y operación del secador, ya que, con esta técnica, es posible identificar puntos críticos donde se pueden generar pérdidas de energía o mejorar la uniformidad del secado.

7. CONCLUSIONES

Al finalizar el estudio del modelo de secado de biomasa forestal se establecen las siguientes conclusiones:

1. Se identificó que la configuración de 90°C de temperatura del aire y 0.5 m de altura del lecho, minimiza los costos totales en el proceso de secado de biomasa forestal. Esta configuración equilibra los tiempos de secado, el consumo de energía y los costos de operación controlados, proporcionando un enfoque eficiente y económico.

2. Al variar las condiciones de operación, se confirmó que la altura del lecho y la temperatura tienen un impacto significativo en los costos. Realizar modificaciones en la altura del lecho requiere de los ajustes adecuados para mantener la eficiencia del flujo de aire y la uniformidad del secado, mientras que temperaturas elevadas aceleran el proceso, reduciendo el tiempo de residencia y el consumo eléctrico.

3. A temperaturas superiores a 50°C se logra un secado más eficiente, reduciendo significativamente los costos de electricidad al disminuir el tiempo de operación del equipo. No obstante, a medida que aumenta la temperatura, los costos de calor incrementan proporcionalmente. Este incremento es compensado por la reducción en otros costos operativos, manteniendo el costo total en niveles óptimos.

4. Una altura de lecho mayor reduce el área requerida del secador, lo que disminuye los costos de inversión. Sin embargo, esto supone un aumento en la resistencia al flujo de aire, incrementando el consumo de energía. Este balance debe ser cuidadosamente considerado en el diseño y operación del sistema.

5. Las condiciones evaluadas muestran que operar a temperaturas por debajo de 50°C no es viable debido a los altos tiempos de secado y los consecuentes costos operacionales. Estos escenarios son económicamente desfavorables incluso cuando los costos de calor son menores.

8. RECOMENDACIONES

Teniendo en cuenta el impacto de la temperatura y la altura del lecho en los costos totales, Se sugiere ampliar el rango de temperaturas estudiadas para evaluar la viabilidad de operar el secador a temperaturas superiores a 90°C. Aunque este trabajo se enfocó en un rango de temperatura limitado, existen investigaciones que sugieren que temperaturas más altas podrían reducir aún más los tiempos de secado y los costos operativos, siempre y cuando no se comprometa la calidad de la biomasa ni la integridad del equipo (Myllymaa et al., 2018).

Es recomendable replicar el modelo con otros tipos de biomasa, como residuos agrícolas o urbanos, considerando características específicas como humedad inicial y densidad aparente, para validar su aplicabilidad en diferentes contextos.

Finalmente, se sugiere implementar en futuros estudios un análisis de sensibilidad que incluya variables como la eficiencia de recuperación de calor, variaciones en la velocidad del aire y el contenido de humedad del aire de entrada, con el fin de obtener un panorama más integral del proceso.

9. REFERENCIAS

Alakangas, E. (2005). *Energy Wood Production Chains in Europe* (R. Madlener & M. Parikka, Eds.). Echaien Consortium.

Alamia, A., Ström, H., & Thunman, H. (2015). Design of an integrated dryer and conveyor belt for woody biofuels. *Biomass and Bioenergy*, *77*, 92–109. https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2015.03.022

Avalos, J. & Cepeda, P. (2024). Investigación Operativa Ámbito Empresarial. La Caracola Editores.

Ayala-Mendivil, N., & Sandoval, G. (2018). Bioenergía a partir de residuos forestales y de madera. *Madera Y Bosques*, *24*. https://doi.org/10.21829/myb.2018.2401877

Besel, S. A. (2007). *Biomasa: Gasificación*.

Bosio, A., & Santa, M. (2023). El Modelo de Programación Lineal. In *Principios de Investigación Operativa*. Universidad Nacional de la Matanza. http://repositoriocyt.unlam.edu.ar/handle/123456789/1682

Brammer, J. G., & Bridgwater, A. V. (1999). Drying technologies for an integrated gasification bio-energy plant. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *3*(4), 243–289. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1364-0321(99)00008-8

Brand, M. A., & Giesel, G. (2017). Influence of Biomass Drying in Energy Cogeneration Boiler Efficiency. *ENERGÍA NA AGRICULTURA*, *32*(2), 132–140. https://doi.org/10.17224/EnergAgric.2017v32n2p132-140

Céspedes, R. (2021). *Métodos de solución y análisis de programación lineal*. Lima. (1st ed.)

De la Rosa, L. R. (2023). *Desarrollo de una herramienta de modelamiento para la evaluación de alternativas de aprovechamiento energético de biomasa en Colombia* [Magíster en Ingeniería Mecánica]. Universidad Nacional de Colombia.

Deboni, T. L., Simioni, F. J., Brand, M. A., & José Costa, V. (2018). Models for estimating the price of forest biomass used as an energy source: A Brazilian case. *Energy Policy*, *127*, 382–391. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.12.021

Delgado, R. (2014). La biomasa como recurso energético. *Energías y Cambio Climático*, 31.

Geankoplis, C. J. (2006). *Procesos de transporte y operaciones unitarias* (Tercera). Compañía Editorial Continental.

Gebreegziabher, T., Olajire Oyedun, A., & Hui, C. W. (2013). Optimum biomass drying for combustion A modeling approach. *Energy*, *53*, 67–73. https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.03.004

Gómez Bardón, M. (2023). *Estudio De Viabilidad Y Diseño Básico De Planta De Biomasa Para Generación De Energía Eléctrica.* Universidad Pontificia Comillas, Madrid

Holmberg, H., & Ahtila, P. (2004). *Comparison of drying costs in biofuel drying between multi-stage and single-stage drying*. Biomass and Bioenergy; 26: 515-530.

Holmberg, H., & Ahtila, P. (2005). *Optimization of the bark drying process in combined heat and power production of pulp and paper mill*. 15–17.

Holmberg, H., Isaksson, J., & Lahdelma, R. (2014). Minimization of total drying costs for a continuous packed-bed biomass dryer operating at an integrated chemical pulp and paper mill. Biomass and Bioenergy, *71*, 431–442. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.09.010

IEA. (2023). *World Energy Outlook*. https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023?language=es

Lee, M., & Kim, J. (2017). Feasibility study and benefit analysis of biomass-derived energy production strategies with a MILP (mixed-integer linear programming) model: Application to Jeju Island, Korea. *Korean Journal of Chemical Engineering*, *34*(6), 1604–1618. https://doi.org/10.1007/S11814-017-0052-Y/METRICS

Myllymaa, T., Holmberg, H. y Ahtila, P. (2018). Evaluación técnico-económica del secado de biomasa en lechos móviles: el efecto de la cinética de secado en los costos de secado. *Drying Technology* , *37* (10), 1201–1214. https://doi.org/10.1080/07373937.2018.1492615

Myllymaa, T., Holmberg, H., Hillamo, H., Laajalehto, T. y Ahtila, P. (2014). Secado de astillas de madera en lechos fijos: cinética de secado y economía del secado en una planta municipal de cogeneración. Drying Technology , 33 (2), 205–215. https://doi.org/10.1080/07373937.2014.945179

Moya, R. Ph. D. (2017). *Uso de la biomasa forestal y resultados de propiedades dendroenergéticas para especies de interés*.

Navidad Palomares, A. (2020). Estudio experimental sobre el secado de huesos de mango para su valorización como biomasa. Escuela Politécnica Superior de Linares, Universidad de Jaén. https://hdl.handle.net/10953.1/12141

Radics, R. I., Dasmohapatra, S., & Kelley, S. S. (2016). Use of linear programming to optimize the social, environmental, and economic impacts of using woody feedstocks

for pellet and torrefied pellet production. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, *10*(4), 446–461. https://doi.org/10.1002/BBB.1658

Rahman, A. A., Sofyan Munawar, S., Ishizaki, R., Samodra Putra, A., Ariesca, R., Sidiq, A. N., Siregar, K., Murata, K., Wiloso, E. I., Ahamed, T., & Noguchi, R. (2024). Optimizing biomass supply for cofiring at power plants to minimize environmental impact: A case of oil palm empty fruit bunches in West Java. *Fuel*, *367*, 131359. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.131359

Red Iberoamericana de Tecnologías de Biomasa y Bioenergía Rural. (2023). *Conversión energética de la Biomasa: bases para su aprovechamiento* (S. Manrique, A. Salvo, C. Brinda, C. Subelza, L. Mosconi, & B. Balderrama, Eds.). CYTED Ediciones. https://www.researchgate.net/publication/377178362

Reyes Plascencia, C., Mora, K., & Tancredi, N. (2024). Bioenergía y desarrollo sostenible: Alternativa en la producción de biocombustibles. *GEOS*, *44*(2). Recuperado a partir de https://geos.cicese.mx/index.php/geos/article/view/91

Rodríguez, N. (2001). *Informática Aplicada a la Ingeniería de Procesos I (Orientación I): Modelado y Optimización*.

Salinas, J. C. C. (2021). Biomasa residual como fuente de energía. *Alternativas de aprovechamiento de los residuos en la agroindustria, Cap 7, 190*. Universidad Nacional de Colombia.

San Segundo, A. (2024). *Estudio de Procesos Industriales de los productos procedentes de la pirólisis de lignina y de sus principales componentes alquil-alcoxifenoles*. Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de València. http://hdl.handle.net/10251/210534

Sofán, S. J. (2022). Análisis exergético local de la gasificación de los residuos de la agroindustria del maíz en un reactor de tubos concéntricos. Maestría en ingeniería mecánica, Universidad de Córdoba.

UNAL. (2018). *Estimación del potencial de conversión a biogás de la biomasa en Colombia y su aprovechamiento*. UPME, Bogotá D.C.

Wang, S., Dai, G., Yang, H., & Luo, Z. (2017). Lignocellulosic biomass pyrolysis mechanism: A state-of-the-art review. *Progress in Energy and Combustion Science*, *62*, 33–86. https://doi.org/10.1016/j.pecs.2017.05.004

Winston, W. (2005). *Investigación de operaciones: Aplicaciones y algoritmos* (Cuarta). International Thomson.

World Energy Council. (2016). *World Energy Resources*. https://www.worldenergy.org/assets/images/imported/2016/10/World-Energy-Resources-Full-report-2016.10.03.pdf

Yan, W.-C., Shen, Y., You, S., Huat Sim, S., Luo, Z.-H., Wah Tong, Y., & Wang, C.-H. (2018). Model-based downdraft biomass gasifier operation and design for synthetic gas production. *Journal of Cleaner Production*, 476–493. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.009

ANEXOS

Anexo 1. Código del modelo desarrollado

```
% optimizacion_biomasa.m
% Cálculo del factor de anualidad
AF = i / (1 - (1 + i)^(-n));
% Límites de las variables de Z,T
lb=[0.1,30];%Límites inferiores:
ub=[0.5,90];%Límites superiores:
x0=[0.3,50]; % Valores iniciales:
% Resultados
Z_opt = opt_values(1);
T_opt = opt_values(2);
% Cálculo costos valores óptimos
[I_inv_opt,A_oper_opt,C_elec_opt,
C_heat_opt]=costos_detallados(Z_o
pt,T_opt,rho_db,mdot_db,s,v,cp_da
,cp_w,deltaH_vapor,x_agua_inicial
,x_agua_final,x_aire,C_heat,C_ele
c,deltaP_pres,eta_fan,  Tentrada,
c,AF);[~,~,A_dryer_opt,eta_termic
a_opt]=restricciones(opt_values,r
ho_db,mdot_db,s,v,cp_da,cp_w,delt
aH_vapor,x_agua_inicial,x_agua_fi
nal, x_aire, Tentrada);
%% Funciones Internas
functionCtotal=costos_totales(x,r
ho_db,mdot_db,s,v,cp_da,cp_w,delt
aH_vapor,x_agua_inicial,x_agua_fi
nal,x_aire,C_heat,C_elec,deltaP_p
res,eta_fan,Tentrada,c,AF)
  % Variables de decisión
Z = x(1); % Altura del lecho (m)
T =x(2);%Temperatura del aire(°C)
  % Área de la secadora
A_dryer=(mdot_db*s)/(rho_db* Z);
% Cálculo del costo de inversión
 log_term = log(A_dryer / 480);
I_tot_dryer=A_dryer*(-3095*log_te
rm+5838);
% Costo de inversión anualizado
  A_inv = AF * I_tot_dryer;
% Cálculo de la entalpía del aire
h_in=cp_da*Tentrada+x_aire*(cp_w
Tentrada + deltaH_vapor);
h_out=cp_da*T+x_aire*(cp_w*T+delt
aH_vapor);
% Consumo de calor
Q=v*A_dryer*1.2*(h_out - h_in);
 % Consumo de electricidad
P_elec=(v*A_dryer*deltaP_pres)/et
a_fan;
%Cálculo de los costos operativos
A_oper=(P_elec*C_elec+Q*C_heat*c;
  % Costo total
  Ctotal = A_inv + A_oper;
end
function[I_inv,A_oper,C_elec_oper
C_heat_oper]=costos_detallados(Z,
T,rho_db,mdot_db,s,v,cp_da,  cp_w,
deltaH_vapor,x_agua_inicial,x_agu
a_final,x_aire,C_heat,C_elec,delt
aP_pres,eta_fan,Tentrada,  c,  AF)
%Cálculo costos valores óptimos
  % Área de la secadora
A_dryer=(mdot_db*s)/(rho_db * Z);
%Cálculo inversión anual(ln)
log_term=log(A_dryer/480);
I_tot_dryer=A_dryer*(-3095*log_te
rm+5838);
% Costo de inversión anualizado
  I_inv = AF * I_tot_dryer;
% Consumo de calor
Q=v*A_dryer*1.2*(h_out - h_in);
% Consumo de electricidad
P_elec=(v*A_dryer*deltaP_pres)/et
a_fan;
%Cálculo de los costos operativos
C_elec_oper=P_elec*C_elec*c*1.79e
-6;
C_heat_oper=Q*C_heat*c* 0.000751;
A_oper=C_elec_oper + C_heat_oper;
end
function[c,ceq,A_dryer,eta_termic
a]=restricciones(x,rho_db,mdot_d,
s,v,cp_da,cp_w,deltaH_vapor,x_agu
a_inicial,  x_agua_final,  x_aire,
Tentrada)
% Variables de decisión
Z = x(1); % Altura del lecho (m)
T=x(2);% Temperatura del aire(°C)
  % Área de la secadora
A_dryer=(mdot_db*s)/(rho_db * Z);
% Restricción área:A_dryer<=480m²
  c(1) = A_dryer - 480;
% Calor total
Q_total=v*A_dryer*1.2*(h_out-h_in
% Calor total suministrado
Q_util=v*A_dryer*(x_agua_inicial-
x_agua_final)*deltaH_vapor;
%Restricciónеficienciatérmica:
 eta_termica = Q_util / Q_total;
 c(2) = 0.7 - eta_termica;
  ceq = [];
end
```