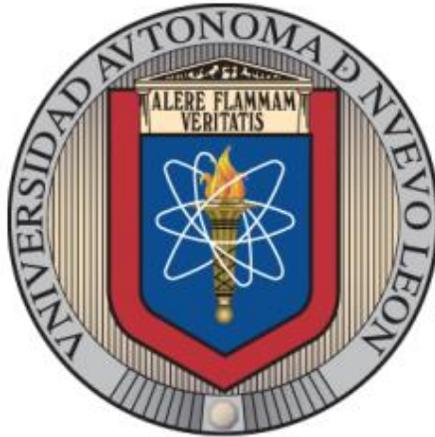


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES



**ADAPTACIÓN DE LOS MODELOS DE TRANSFERENCIA DE MASA
A LOS MODELOS CINÉTICOS EN LA PREDICCIÓN DE LA
VELOCIDAD DE SECADO DE BIOMASA FORESTAL**

POR:

Víctor Daniel Núñez Retana

**Como requisito parcial para obtener el grado de
DOCTOR EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN MANEJO DE RECURSOS
NATURALES**

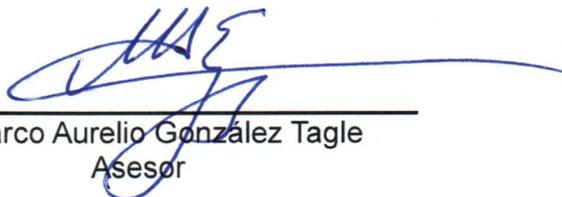
Agosto, 2024

**ADAPTACIÓN DE LOS MODELOS DE TRANSFERENCIA DE MASA A LOS
MODELOS CINÉTICOS EN LA PREDICCIÓN DE LA VELOCIDAD DE SECADO DE
BIOMASA FORESTAL**

Aprobación de Tesis



Dra. Wibke Himmelsbach
Director de tesis



Dr. Marco Aurelio González Tagle
Asesor



Dr. Humberto González Rodríguez
Asesor



Dra. María Inés Yáñez Díaz
Asesor



Dr. Borja Velázquez Martí
Asesor externo y Codirector

Agosto, 2024

AGRADECIMIENTOS

Al concluir esta tesis, me llena de gratitud el poder reconocer y agradecer a todas aquellas personas que, de una u otra manera, han sido parte de este logro y de mi camino académico.

Agradezco a la Dra. Wibke por su guía, paciencia y valiosos comentarios. Su apoyo en las diversas etapas de esta investigación fue crucial para el desarrollo de este proyecto. También quiero agradecer a mis asesores, el Dr. Marco, el Dr. Humberto y la Dra. Inés, por sus sugerencias y enseñanzas a lo largo del doctorado; su perspectiva me permitió explorar y comunicar mejor los aportes de esta tesis.

Agradezco profundamente al Dr. Borja por compartir conmigo sus conocimientos y enseñarme más de lo necesario para avanzar en este proyecto. Su paciencia, guía y dedicación, fueron fundamentales en cada etapa de la investigación.

Mi sincero agradecimiento al Dr. Artemio por su constante apoyo y colaboración. Aprecio profundamente su disposición para ayudarme a lo largo de mi formación. Su influencia ha sido invaluable para mi desarrollo como investigador, y le estaré siempre agradecido.

A mis papás, a mi hermano Turín, a mis primos Ricardo y Fernando, a mis amigos Juan, Javis, Jorge y Norma, y a todas aquellas personas que, a lo largo de estos años, compartieron conmigo momentos de desconexión, alegrías, aprendizaje y crecimiento. Gracias por su apoyo constante, por entender y respaldar mis compromisos y sacrificios. Su presencia y aliento fueron invaluableles para continuar con este proyecto.

Finalmente, agradezco al Departamento de Ingeniería Rural y Agroalimentaria de la Universidad Politécnica de Valencia por el apoyo y facilidades brindadas durante mi estancia en sus instalaciones, así como al CONAHCYT por la beca otorgada para la realización de este doctorado.

DEDICATORIA

A mis padres

Leonardo Núñez García

Irene Retana Arreola

ÍNDICE

RESUMEN	1
ABSTRACT	4
INTRODUCCIÓN	7
JUSTIFICACIÓN.....	10
HIPÓTESIS	11
OBJETIVOS.....	12
Objetivo general	12
Objetivos específicos	12
CAPÍTULO I. ANTECEDENTES.....	13
1.1. Percepción limitada y priorización competitiva en el secado de biomasa energética.....	13
1.1.1. Prácticas tradicionales	14
1.1.2. Falta de inversión multidisciplinaria	15
1.1.3. Priorización de otras áreas de investigación	16
1.1.4. Conciencia limitada en países en desarrollo y enfoque a corto plazo.....	17
1.2. Obstáculos en el secado de la biomasa.....	18
1.2.1. Limitaciones energéticas	19
1.2.2. Limitaciones tecnológicas	22
1.2.3. Limitaciones económicas	25
1.2.4. Limitaciones ambientales	26
1.3. Perspectivas actuales de investigación en el secado de biomasa energética	28
1.4. Referencias bibliográficas de introducción y antecedentes	32
CAPÍTULO II. DISEÑO DEL PROTOTIPO EXPERIMENTAL DE SECADO	42

CAPÍTULO III. MODELOS DE TRANSFERENCIA DE MASA PARA PREDECIR LA CINÉTICA DEL SECADO CONVECTIVO DE ASTILLAS DE MADERA A PARTIR DE DIFERENTES ALTURAS DE LLENADO	46
3.1. Resumen	46
3.2. Abstract.....	46
3.3. Introducción	48
3.4. Materiales y Métodos	52
3.4.1. Material de estudio.....	52
3.4.2. Procedimiento de medida	53
3.4.3. Caracterización del proceso de secado.....	54
3.4.4. Cálculo del coeficiente de transferencia de masa por convección	57
3.4.5. Análisis estadístico.....	59
3.5. Resultados y Discusión.....	60
3.5.1. Descripción estadística de las variables medidas	60
3.5.2. Efecto de la altura de la columna de astillas	66
3.5.3. Efecto de la velocidad de circulación del aire	67
3.5.4. Efecto de la temperatura del aire.....	67
3.5.5. Análisis de las interacciones	68
3.5.6. Modelos de transferencia de masa en la predicción del tiempo de secado	71
3.6. Conclusiones.....	73
3.7. Referencias bibliográficas.....	76
CAPÍTULO IV. INFLUENCIA DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA EN EL SECADO POR CONVECCIÓN DE ASTILLAS DE MADERA DE PINO.....	80
4.1. Resumen	80
4.2. Abstract.....	80
4.3. Introducción	81
4.4. Materiales y Métodos	85
4.4.1. Colección y acondicionamiento del material	85

4.4.2. Establecimiento y desarrollo del experimento	86
4.4.3. Análisis de la cinética experimental de secado por convección .	87
4.4.4. Cálculo de la transferencia de masa teórica por convección	88
4.4.5. Análisis estadístico.....	91
4.5. Resultados y Discusión.....	92
4.5.1. Caracterización del proceso de secado.....	92
4.5.2. Tamaño de partícula	94
4.5.3. Velocidad y temperatura del aire	97
4.5.4. Aplicación de los modelos de transferencia de masa en el proceso de secado convectivo.....	98
4.6. Conclusiones.....	102
4.7. Referencias bibliográficas.....	103
CONCLUSIONES GENERALES	110
ANEXOS	112
Aplicación práctica	118

ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo I

Figura 1. 1. Consumo de energía de cada operación unitaria en una industria de pélets. De acuerdo con Pirraglia <i>et al.</i> (2010).	21
Figura 1. 2. Desglose del uso total de calor como combustible para un secador convectivo típico calentado con vapor, suponiendo una pérdida de distribución de vapor del 10% y retorno de condensado a 90 °C. De acuerdo con Kemp (2012).	22
Figura 1. 3. Registro de un secador antiguo en el estado de Durango, México. La recopilación de datos es limitada, propensa a errores humanos y a las condiciones físicas del lugar en el que se encuentra.	23

Capítulo II

Figura 2. 1. Secador experimental de biomasa desarrollado y fabricado para la realización de los tratamientos de secado y la medición de pérdida de humedad en las astillas de madera de pino.	44
Figura 2. 2. Diagrama del secador experimental de biomasa que muestra sus componentes.	45

Capítulo III

Figura 3. 1. Astillas de pino utilizadas en los tratamientos de secado: a) Astillas secas, b) Astillas húmedas en acondicionamiento, c) Astillas en secador.	53
Figura 3. 2. (a) Pérdida de humedad de las astillas de madera de pino a lo largo del tiempo, (b) Velocidad de secado de las astillas de madera de pino.	60
Figura 3. 3. Intervalos de la Mínima Diferencia Significativa (LSD) para la interacción entre los rangos de temperatura del aire y la altura en (a) la velocidad absoluta de secado y (b) la pendiente de la variación de la humedad. X se refiere al factor de escala	70
Figura 3. 4. Intervalos de la Mínima Diferencia Significativa (LSD) para la interacción entre los rangos de temperatura y velocidad del aire en la pendiente	

de la variación de la humedad contra el contenido de humedad. X se refiere al
valor de escala 71

Capítulo IV

Figura 4. 1. Astillas de madera de pino, a la izquierda se muestran
las partículas pequeñas (3.15-16.0 mm), y a la derecha las partículas grandes
(16.1-45.0 mm)..... 86

ÍNDICE DE TABLAS

Capítulo I

Tabla 1. 1. Limitaciones en el secado de biomasa energética y sus implicaciones.	18
---	----

Capítulo III

Tabla 3. 1. Niveles de los factores evaluados en cada tratamiento.	54
Tabla 3. 2. Descripción estadística de las variables cinéticas del proceso de secado en la configuración experimental para cada uno de los niveles de los factores estudiados.	63
Tabla 3. 3. Valores promedio y resumen del ANOVA de las velocidades de secado y las pendientes de variación de la humedad de las astillas de pino por altura en el secador, y por rangos de velocidad del aire y temperatura.	65
Tabla 3. 4. Ecuaciones que describen la velocidad relativa de secado media, la velocidad absoluta de secado media y la variación de humedad media para diferentes alturas de la columna de astillas de madera.	72

Capítulo IV

Tabla 4. 1. Rangos de los factores evaluados en cada tratamiento.	86
Tabla 4. 2. Valores experimentales promedio del proceso de secado.	92
Tabla 4. 3. Efecto de los factores estudiados sobre las velocidades de secado medias y la variación de humedad media de las astillas de <i>Pinus</i> spp.	93
Tabla 4. 4. Modelos derivados de la aplicación de los modelos teóricos de transferencia de masa para tamaños de partículas de astillas de madera de <i>Pinus</i> spp.	100

RESUMEN

El secado de la biomasa energética es esencial para asegurar un suministro constante y de alta calidad para la industria energética. Este proceso no sólo maximiza la eficiencia en el aprovechamiento energético de la biomasa, sino que también puede reducir significativamente las emisiones contaminantes asociadas, siempre que se utilicen tecnologías adecuadas para su combustión y tratamiento. Además, el secado de la madera tiene un impacto económico importante, ya que la venta de madera y sus derivados constituye una fuente vital de ingresos para muchas comunidades rurales en regiones donde la actividad forestal es predominante, promoviendo el desarrollo local y la sostenibilidad económica.

La presente investigación tuvo como objetivo analizar y ajustar las ecuaciones teóricas empleadas en los modelos de transferencia de masa para estimar la velocidad de secado en astillas de madera de pino, considerando diferentes alturas de columnas de astillas y tamaños de partícula. Con este propósito, se diseñó y construyó un secador experimental de biomasa, que permitió, bajo diferentes niveles de capacidad mínima y máxima, establecer una serie de tratamientos de secado evaluados en diferentes condiciones.

En el primer capítulo, se abordan los desafíos y limitaciones en el secado de la biomasa energética, comenzando con una discusión sobre la percepción limitada y la priorización competitiva en este proceso. Se examinan las prácticas tradicionales utilizadas en el secado y cómo la falta de inversión multidisciplinaria ha afectado el avance en esta área. Además, el capítulo analiza los principales obstáculos que enfrentan las operaciones de secado de biomasa, incluyendo las limitaciones energéticas, tecnológicas, económicas y ambientales, ofreciendo un panorama integral de los factores que complican la optimización de este proceso clave en la industria energética.

El capítulo segundo, DISEÑO EXPERIMENTAL DEL PROTOTIPO DE SECADO, se centra en las especificaciones técnicas detalladas del prototipo utilizado para el secado de las astillas energéticas. Este capítulo describe los componentes y materiales seleccionados, así como el diagrama del sistema que

ilustra su configuración y funcionamiento. A través de esta información, se proporciona una visión completa del diseño que sustenta las pruebas y evaluaciones realizadas en la presente investigación.

En el capítulo tercero, MODELOS DE TRANSFERENCIA DE MASA PARA PREDECIR LA CINÉTICA DEL SECADO CONVECTIVO DE ASTILLAS DE MADERA A PARTIR DE DIFERENTES ALTURAS DE LLENADO, se presentan resultados que demuestran que la velocidad de secado de las astillas en un proceso convectivo con aire caliente no es constante, sino que disminuye con el tiempo. Además, se identificó que el contenido crítico de humedad es superior al 42%. Para predecir el contenido de agua eliminado por unidad de tiempo, se aplicaron modelos de transferencia de masa tradicionales a partir de la temperatura del aire, humedad relativa, y velocidad de circulación del aire, y se compararon con datos experimentales, realizando ajustes mediante modelos de regresión que alcanzan valores de r^2 de 0.86, lo que indica una buena compensación. También, se observó que factores como la altura de la columna de astillas tienen un impacto significativo en las ecuaciones predictivas de la velocidad de secado.

En el capítulo cuarto, INFLUENCIA DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA EN EL SECADO POR CONVECCIÓN DE ASTILLAS DE MADERA DE PINO, se destacan hallazgos sobre cómo el tamaño de las partículas afecta el proceso de secado. Los modelos desarrollados explican entre el 58% y el 83% de la variabilidad observada en los tratamientos con distintos tamaños de partícula. Se corrobora que las partículas más pequeñas (3.15-16.0 mm) alcanzan velocidades de secado más rápidas en comparación con las más grandes (16.1-45.0 mm) con una velocidad de eliminación de agua de 0.0049 y 0.0044 g s⁻¹, respectivamente, verificándose que las partículas grandes presentan una mayor variación en la humedad. Nótese que la velocidad de secado en partículas pequeñas es aproximadamente 1.11 veces mayor que en las grandes. La combinación de partículas pequeñas con una velocidad de aire adecuada y modelos de transferencia de masa adaptados mejora tanto la eficiencia como la uniformidad de la humedad final en el secado.

Este trabajo presenta un avance significativo en el campo del secado de biomasa forestal al proponer nuevas ecuaciones derivadas de modelos de transferencia de masa adaptados a modelos cinéticos. Estas ecuaciones permiten predecir con precisión la velocidad de secado a partir de datos del aire, ofreciendo a la comunidad científica una herramienta novedosa para calcular el tiempo de secado. Los modelos desarrollados son efectivos para predecir la velocidad de secado y explican gran parte de la variabilidad observada en los diferentes tratamientos. Además, en el anexo se incluye un ejemplo práctico de la aplicación de los cálculos propuestos, proporcionando una herramienta útil para validar la metodología en escenarios reales. No obstante, es esencial reconocer y discutir las limitaciones metodológicas y del equipo que afectan la precisión del estudio. En futuros trabajos, será crucial abordar estas fuentes de error para mejorar la calidad de los datos y optimizar la capacidad predictiva de los modelos, lo que permitirá obtener resultados más fiables y representativos. La metodología y los modelos de regresión presentados proporcionan un enfoque innovador y práctico que no existía previamente.

ABSTRACT

The drying of energy biomass is essential to ensure a constant and high-quality supply for the energy industry. This process not only maximizes the efficiency in the energy use of biomass but can also significantly reduce associated pollutant emissions, provided that appropriate technologies are used for its combustion and treatment. Furthermore, wood drying has a significant economic impact, as the sale of wood and its derivatives constitutes a vital source of income for many rural communities in regions where forestry is predominant, promoting local development and economic sustainability.

This research aimed to analyze and adjust the theoretical equations used in mass transfer models to estimate the drying rate of pine wood chips, considering different chip column heights and particle sizes. To achieve this, an experimental biomass dryer was designed and constructed, allowing for the establishment of a series of drying treatments under different minimum and maximum capacity levels, which were then evaluated under various conditions.

The first chapter addresses the challenges and limitations in the drying of energy biomass, beginning with a discussion on the limited perception and competitive prioritization in this process. It examines traditional practices used in drying and how the lack of multidisciplinary investment has hindered progress in this area. Additionally, the chapter analyzes the main obstacles faced by biomass drying operations, including energy, technological, economic, and environmental limitations, providing a comprehensive overview of the factors that complicate the optimization of this key process in the energy industry.

The second chapter, EXPERIMENTAL DESIGN OF THE DRYING PROTOTYPE, focuses on the detailed technical specifications of the prototype used for drying energy chips. This chapter describes the selected components and materials, as well as the system diagram that illustrates its configuration and operation. Through this information, a comprehensive overview of the design supporting the tests and evaluations conducted in the present research is provided.

In the third chapter, MASS TRANSFER MODELS TO PREDICT THE CONVECTIVE DRYING KINETICS OF WOOD CHIPS FROM DIFFERENT FILLING HEIGHTS, results are presented demonstrating that the drying rate of wood chips in a convective process with hot air is not constant but decreases over time. It was also identified that the critical moisture content is above 42%. To predict the amount of water removed per unit of time, traditional mass transfer models were applied based on-air temperature, relative humidity, and air circulation speed, and compared with experimental data. Adjustments were made using regression models, achieving r^2 values of 0.86, indicating a good fit. It was also found that factors such as the height of the wood chip column significantly impact the predictive equations for drying rate.

In the fourth chapter, INFLUENCE OF PARTICLE SIZE ON THE CONVECTIVE DRYING OF PINE WOOD CHIPS, findings are highlighted regarding how particle size affects the drying process. The developed models explain between 58% and 83% of the variability observed in treatments with different particle sizes. It is confirmed that smaller particles (3.15-16.0 mm) reach faster drying rates compared to larger ones (16.1-45.0 mm), with water removal rates of 0.0049 and 0.0044 g s^{-1} , respectively, verifying those larger particles exhibit greater moisture variation. It should be noted that the drying rate for smaller particles is approximately 1.11 times higher than that of larger ones. Combining smaller particles with appropriate air velocity and adapted mass transfer models enhances both the efficiency and the uniformity of the final moisture content in the drying process.

This work presents a significant advancement in forest biomass drying by proposing new equations derived from mass transfer models adapted to kinetic models. These equations allow for accurate prediction of drying rates based on air data, providing the scientific community with a novel tool for calculating drying time. The developed models effectively predict drying rates and explain much of the variability observed across different treatments. Additionally, the appendix includes a practical example of applying the proposed calculations, providing a useful tool to validate the methodology in real-world scenarios. However, it is essential to

acknowledge and discuss the methodological and equipment limitations that affect the study's accuracy. Future work should address these sources of error to improve data quality and optimize the predictive capacity of the models, leading to more reliable and representative results. The methodology and regression models presented offer an innovative and practical approach that did not previously exist.

INTRODUCCIÓN

La conversión de la biomasa en biocombustibles sólidos como fuente de energía renovable y como reductor en las emisiones de gases de efecto invernadero se ha convertido en una alternativa prometedora. Entre los procesos para llevar a cabo dicha tarea se encuentra principalmente el secado de la biomasa, que es una operación conocida por ser altamente demandante de energía (Bengtsson, 2008).

Cuando se utiliza la biomasa como combustible, la deshidratación de la misma es de gran importancia debido a que durante la combustión, la presencia de agua hace que se consuma más energía en el proceso de evaporación, y por tanto, aumente la energía de activación para la ignición y se libere menos calor en el proceso (Reineking *et al.*, 2024). Así, el secado constituye una operación básica, cuya finalidad es la eliminación del agua de las partículas para mejorar las propiedades caloríficas en los biocombustibles sólidos.

Entre los métodos más comunes para el secado de biomasa se encuentran el secado al aire libre y el secado en secadores de convección forzada. En el secado al aire libre, la biomasa se seca mediante procesos de difusión, convección y radiación, los cuales dependen de las condiciones ambientales, como la temperatura, la humedad relativa y la exposición al sol (Bond & Espinoza, 2016). En contraste, el secado en secadores utiliza energía adicional para proporcionar el calor necesario para la evaporación de la humedad, aplicando procesos convectivos que permiten un control más preciso y eficiente del proceso de secado. Estos secadores están diseñados para optimizar las condiciones de secado, acelerando la eliminación de humedad en comparación con el método al aire libre (Yi *et al.*, 2020).

Por otro lado, el diseño y dimensionado de secadores de biomasa son temas de creciente importancia, ya que es crucial desarrollar tecnologías que sean asequibles y de bajo impacto ambiental. Esto exige soluciones innovadoras que equilibren la eficiencia del proceso de secado con la sostenibilidad (Griñán-Egea, 2020).

A pesar de que el proceso de secado de la biomasa ha sido empleado por el hombre durante siglos, una de las incógnitas que surgen en el diseño de los secadores es conocer el tiempo que requiere el proceso. Esto condiciona sus dimensiones y la planificación de la industria destinataria de esos materiales. El modelado de su cinética no es trivial debido principalmente a la complejidad inherente al proceso simultáneo de transferencia de calor y masa, así como a la complejidad de los compuestos biológicos sobre los que se aplican los modelos (Chandra Mohan & Talukdar, 2010). De forma general los factores que influyen en el secado realizado con aire caliente son caudal de aire, temperatura del aire, humedad relativa, tamaño de partícula, porosidad y naturaleza del material a desecar.

El problema principal de las curvas experimentales es que se obtienen en condiciones de aire específicas, incluyendo caudal, temperatura y humedad relativa que se mantienen constantes durante su desarrollo. Como resultado, estos modelos presentan limitaciones significativas cuando se pretende predecir el secado de las condiciones ambientales distintas, ya que no están diseñados para adaptarse a variaciones en el caudal de aire, la temperatura o la humedad relativa. Esta falta de flexibilidad limita su aplicabilidad en escenarios donde las condiciones de operación no son las mismas que las utilizadas para generar las curvas iniciales, afectando la precisión y la utilidad de los modelos en entornos variables.

Es por eso, que el principal objetivo de esta tesis fue poder modelar los procesos de transferencia de masa por convección y analizar la rapidez con la que los materiales porosos se pueden secar, específicamente con relación a las condiciones experimentales. La tesis aborda este tema desde tres enfoques principales. Se realiza una revisión exhaustiva de la literatura existente sobre el secado de la biomasa energética, abordando los desafíos tecnológicos y las dificultades que enfrentan los países en desarrollo. A continuación, el segundo capítulo se centra en el diseño y construcción de un secador experimental de biomasa, proporcionando detalles técnicos y constructivos del prototipo. Finalmente, los capítulos tres y cuatro se centran en la determinación de la

velocidad de secado bajo diferentes condiciones, evaluando el impacto de distintas alturas de columnas de biomasa y tamaños de partícula en el proceso de secado.

JUSTIFICACIÓN

Actualmente, existe la necesidad de mejorar la predicción de la velocidad de secado de biomasa forestal mediante la adaptación de los modelos de transferencia de masa a los modelos cinéticos. El secado de biomasa forestal es un proceso importante en la industria de la bioenergía, ya que afecta la calidad y eficiencia de la producción de biocombustibles sólidos. Por tanto, es fundamental comprender y predecir la velocidad de secado de la biomasa forestal para optimizar los procesos de secado y mejorar la eficiencia energética.

Existen diversos modelos matemáticos teóricos y experimentales que buscan predecir la cinética de secado de diferentes tipos de biomasa. Sin embargo, aún no existe un modelo unificado que permita predecir la evolución de la humedad para diversos materiales debido a la amplia diversidad de biomateriales y las grandes diferencias entre las condiciones en las que se puede dar el proceso. Una línea de trabajo sería conocer la transferencia de masa en el proceso del secado de biomasa como base para el desarrollo de equipos eficientes en el uso de energía y tiempo invertido en el secado. El estudio de la cinética en la transferencia de masa permite comprender cómo se mueve la humedad en el material y cómo influyen las variables del proceso, como la temperatura, la humedad de entrada y la velocidad del aire, en la velocidad de secado.

En resumen, el conocimiento de la transferencia de masa en el secado de biomasa es esencial para el desarrollo de equipos eficientes en el uso de energía y tiempo invertido en el secado. Los modelos matemáticos y experimentales son herramientas utilizadas para estudiar y comprender este proceso, permitiendo reducir los tiempos de desarrollo de nuevas tecnologías de secado y mejorar la eficiencia energética.

HIPÓTESIS

Los modelos de transferencia de masa basados en analogías con la transferencia de calor pueden ser utilizados para predecir la masa de agua desecada por unidad de tiempo en un sistema convectivo en la interfaz de un sólido poroso húmedo, como las astillas de madera. Se propone que estos modelos pueden relacionarse con datos experimentales utilizando ecuaciones lineales simples.

OBJETIVOS

Objetivo general

Evaluar la aplicabilidad, adaptabilidad y proponer ajustes a las ecuaciones de correlación aplicadas a los modelos de transferencia de masa para la obtención del número de Sherwood y posterior cálculo del coeficiente de transferencia de masa por convección para determinar la velocidad de secado en astillas energéticas de pino.

Objetivos específicos

- Construir y ajustar un secador experimental de biomasa energética-astillada.
- Obtener ecuaciones que relacionen la masa de agua secada por unidad de tiempo con las condiciones del aire caliente, incluyendo la velocidad de flujo del aire, la temperatura y la humedad relativa, en las cuales se llevará a cabo el proceso de secado.
- Explorar y evaluar los valores cinéticos en cada tamaño de astillas de madera de pino en un proceso de secado por convección dentro de un secador de capa delgada donde el aire circula verticalmente entre una columna de astillas.

CAPÍTULO I. ANTECEDENTES

La búsqueda de soluciones que mejoren la eficiencia energética en el secado de biomasa para biocombustibles es esencial para promover prácticas sostenibles a nivel económico, ambiental y social (Romdhana *et al.*, 2016). La biomasa, como fuente de energía renovable, se ve comprometida si el proceso de secado no es eficiente, pudiendo aumentar las emisiones y los costos asociados (Bond & Espinoza, 2016). Adoptar tecnologías más eficientes y la integración de fuentes de energía renovable no solo contribuyen a la reducción de emisiones y a la sostenibilidad ambiental, sino que también generan ahorros económicos significativos, crucial para la viabilidad de la producción de biomasa en países en desarrollo (Szulecka, 2019). Además, mejorar la eficiencia energética no solo impacta a nivel macroeconómico, sino que también beneficia directamente a comunidades locales, al hacer que la energía sea más accesible y sostenible, contribuyendo al empoderamiento económico y al desarrollo sostenible a nivel comunitario (Richter *et al.*, 2009). En última instancia, esta búsqueda de eficiencia energética se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, promoviendo la acción por el clima y asegurando un acceso factible y limpio a la energía (Katila *et al.*, 2019).

A pesar de la creciente atención a la biomasa como fuente de energía, hay una carencia de revisión exhaustiva en la literatura que aborde los obstáculos específicos en el proceso de secado, especialmente en el contexto de países en desarrollo. Identificar estas brechas es esencial para orientar futuras investigaciones y promover soluciones innovadoras (Mujumdar, 2007).

1.1. Percepción limitada y priorización competitiva en el secado de biomasa energética

En el ámbito del secado de biomasa energética en países en desarrollo, la falta de comprensión total sobre la importancia de optimizar el proceso y la competencia por recursos en la asignación de fondos para otras áreas prioritarias son desafíos destacados. Con la percepción limitada pretendemos referirnos a la

resistencia al cambio y la falta de comprensión de los beneficios económicos y ambientales. Simultáneamente, la priorización competitiva señala cómo la asignación de recursos a otras áreas puede frenar el progreso en la investigación del secado de biomasa a escala industrial. Este análisis explorará las implicaciones de estas limitaciones y la competencia por recursos en el desarrollo de tecnologías y prácticas de secado.

1.1.1. Prácticas tradicionales

Las comunidades en países en desarrollo a menudo siguen prácticas tradicionales en la gestión de la biomasa energética. Estas prácticas pueden basarse en métodos ancestrales de secado que podrían no ser eficientes ni sostenibles a escala industrial (Masud *et al.*, 2020). La resistencia al cambio y la falta de adopción de tecnologías modernas pueden ser obstáculos significativos.

Tradicionalmente, la creación de horarios de secado ha seguido un enfoque cuidadoso, utilizando el método de prueba y error a partir de experimentos a pequeña escala en los tipos particulares de madera de interés. En el caso de bosques tropicales, que suelen albergar diversas especies dispersas, identificar cada especie individualmente y realizar procesos de secado por separado resulta poco económico o práctico (Perré & Keey, 2014). Zavala-Zavala (2016), en su trabajo como ejemplo, formaron grupos de especies semejantes en densidad básica para integrar volúmenes acordes con las capacidades de las estufas. Mientras que Simo-Tagne *et al.* (2020), desarrollaron un modelo que puede ser usado para simular en particular el secado de cuatro maderas tropicales originarias de Camerún. En cambio, en bosques templados, donde la producción puede centrarse en un solo tipo de árbol o en un conjunto limitado de especies, es posible desarrollar horarios específicos detallados para cada una de estas especies (Perré & Keey, 2014). Ejemplo de esto son los programas de secado de alta temperatura aplicados a maderas blandas (Cai & Oliveira, 2008). A pesar de que de acuerdo con la literatura es posible desarrollar programas de secado para cada tipo de madera en particular, Langrish & Walker (2006) mencionan que no es una práctica adecuada mezclar especies o tamaños de madera, ya que el programa debe

ajustarse al material que tarda más en secarse, es decir, las tablas que tienen el secado más lento o son más propensas a degradarse.

1.1.2. Falta de inversión multidisciplinaria

La investigación efectiva en el secado de biomasa energética a menudo requiere enfoques multidisciplinarios que integren la ingeniería, la biotecnología, la economía y otros campos. Por ejemplo, tratándose particularmente del diseño de secadores, se requieren metodologías complejas y especializadas de transferencia de calor y análisis técnico-económico que deben abordarse desde diversas disciplinas (Bergues-Ricardo *et al.*, 2010). Bergues-Ricardo & Díaz-López (2014) mencionan que desde un “abordaje integral” se puede combatir este tipo de tendencias. Es decir, un enfoque opuesto al tradicional que considera el secado como un conjunto de eventos o aplicaciones locales aisladas dirigidas a propósitos específicos. En esa línea, Bergues-Ricardo *et al.* (2008) examinan específicamente el uso de secadores solares cubanos, analizando el proceso desde perspectivas tecnológicas, termoenergéticas y sociales.

Por otro lado, la falta de inversión en equipos y expertos de diferentes disciplinas puede limitar el desarrollo integral de soluciones efectivas relacionadas con el secado. Por tanto, se requiere una iniciativa concentrada que involucre la colaboración entre la industria y la academia (Mujumdar, 2007; Sianipar *et al.*, 2013). A pesar de que el proceso de secado puede considerarse como una disciplina consolidada, persisten numerosos desafíos complejos sin resolver (Wang *et al.*, 2015). Esta colaboración no solo dará lugar a profesionales altamente capacitados, sino que también generará tecnologías mejoradas con beneficios tanto para la industria como para los consumidores en general (Mujumdar, 2007). Ejemplo de esto es lo mencionado por Areo *et al.* (2023), quienes recomiendan que para fomentar la adopción de técnicas de modificación de madera en Nigeria, su gobierno debería invertir en instalaciones de secado y tratamiento para garantizar la calidad de sus productos.

Si los gobiernos y las comunidades no comprenden los beneficios económicos y ambientales de mejorar las prácticas de secado, es menos probable que asignen recursos y apoyo a la investigación en este campo.

1.1.3. Priorización de otras áreas de investigación

En algunos casos, los recursos limitados y la competencia por la financiación pueden llevar a la priorización de otras áreas de investigación consideradas más urgentes o estratégicas (Wang *et al.*, 2016). Esto puede dejar al secado de biomasa energética en un segundo plano y contribuir a la falta de avances en este campo.

La falta de inversión adecuada en investigación y desarrollo para mejorar las tecnologías de secado puede limitar la eficiencia y la sostenibilidad de la cadena de valor de la biomasa energética en países en desarrollo (Scherr, 2004). Además, la competencia por los recursos financieros puede llevar a la preferencia por proyectos que aborden problemas inmediatos, como la seguridad alimentaria o la salud pública, relegando las iniciativas relacionadas con el secado de biomasa energética a un nivel inferior en la lista de prioridades. Esto puede impactar negativamente en la capacidad de estos países para aprovechar plenamente el potencial de la biomasa o de otros recursos como fuente de energía sostenible. Ejemplo de esto es presentado por Ndukwu *et al.* (2018), quienes en su análisis, ejemplifican cómo se realiza el secado solar en diversas regiones de África, destacando que a pesar de la abundante exposición solar, la investigación sobre este método de secado en los países africanos es limitada en general y necesita inversión para promover su desarrollo.

En el futuro, por ejemplo, se podría explorar la influencia del secado en aspectos sociales. Aunque no podamos establecer una relación directa entre las inversiones en innovación rural y la disminución de otros problemas sociales, es importante considerar el estímulo a la investigación y desarrollo en tecnologías de secado como parte de una política orientada a alcanzar algunos objetivos del desarrollo sostenible (Martynenko & Alves-Vieira, 2023).

1.1.4. Conciencia limitada en países en desarrollo y enfoque a corto plazo

La falta de conciencia sobre la importancia del secado de biomasa energética a nivel industrial puede ser un desafío. A pesar del papel clave del secado térmico en la industria, la necesidad de investigación surgió después de la crisis energética de los años 70's, y aunque el precio del petróleo disminuyó, la conciencia sobre mejorar el secado para ahorrar energía persiste (Mujumdar, 2007). Por ejemplo, en muchas zonas rurales remotas de Asia, hay una gran cantidad de materiales de construcción naturales y biocombustibles, como la madera, pero la alfabetización en ciencia y tecnología es limitada (Chua & Chou, 2003). En otros casos, pueden existir estrictas leyes forestales que obstaculicen el acceso a recursos leñosos (Barasa *et al.*, 2022).

Usualmente, quienes toman decisiones, ya sean fabricantes, inversionistas, economistas o tomadores de decisiones, seleccionan proyectos considerando su retorno económico a lo largo del ciclo de vida, guiados por el principio del "valor temporal del dinero" (Hasan & Langrish, 2016). Esto refleja un enfoque a corto plazo, destacando la ausencia de una perspectiva a largo plazo que podría obstaculizar el desarrollo sostenible y la implementación de soluciones innovadoras. En ese contexto, el pago por servicios ambientales podría ser una herramienta relevante, ya que podría contrarrestar la falta de perspectiva a largo plazo y fomentar prácticas más sostenibles al reconocer y valorar los servicios que los ecosistemas proporcionan a lo largo del tiempo (Unai & Corbera, 2011).

A lo largo de las últimas décadas, ha habido avances constantes en las tecnologías de secado. Sin embargo, el ritmo de innovación no ha experimentado un aumento significativo, en parte debido a los extensos ciclos de vida de los secadores y a la relativa estabilidad en los costos de combustible durante los últimos años (Mujumdar, 2007). Hasta el momento, no han surgido tecnologías de secado radicalmente disruptivas, y no se anticipa que lo hagan en el futuro cercano, al menos en países en desarrollo.

1.2. Obstáculos en el secado de la biomasa

El secado de biomasa para producir biocombustibles sólidos en países en desarrollo enfrenta desafíos energéticos, tecnológicos, ambientales y económicos. La alta demanda de energía plantea dudas sobre su viabilidad en entornos con recursos limitados, mientras que las disparidades en la disponibilidad de tecnologías eficientes complican su implementación (Ndukwu *et al.*, 2018). Por otro lado, las implicaciones ambientales, como las emisiones de contaminantes atmosféricos, resaltan la necesidad de un enfoque equilibrado (Pirasteh *et al.*, 2014). Mientras que económicamente, las inversiones iniciales y los costos operativos son obstáculos significativos, especialmente en entornos económicos desfavorecidos (Sfeir *et al.*, 2021). En la Tabla 1.1 se resumen diversos obstáculos en el secado de biomasa energética.

Tabla 1. 1. Limitaciones en el secado de biomasa energética y sus implicaciones.

Tipo	Causa	Consecuencias	Referencia
Energético	Consumo ineficiente de energía	Costos operativos elevados	Vigants <i>et al.</i> (2015)
		Emisiones GEI	Johnsson <i>et al.</i> (2019) Martin <i>et al.</i> (2000)
	Pobre aislamiento y hermeticidad en secadores	Pérdidas de calor	Erbay & Icier (2009)
		Costos adicionales	Kemp (2012)
	Duración prolongada del proceso de secado	Requiere más tiempo y energía	Pirraglia <i>et al.</i> (2010) Zhang & Liu (2006)
Costos adicionales		Bianchini & Simioni (2021)	
		Impacto ambiental negativo	Dzurenda & Deliiski (2012)
Tecnológico	Tecnología obsoleta	Control limitado del proceso	Briens <i>et al.</i> (2008)
	Falta de sistemas de monitoreo	Calidad inconsistente del producto final	Li <i>et al.</i> (2011)
	Falta de mantenimiento	Pérdida de energía	Gorišek & Straže (2010)
		Tiempos de inactividad prolongados	Calvo & Domingo (2021)
		Costos adicionales para con reparaciones	Aipov <i>et al.</i> (2019)
Periodos prolongados de secado	Defectos en el material	Yin & Liu (2021)	
	Disminución en la capacidad de producción	Brummack <i>et al.</i> (2015)	
	Mayores costos energéticos	Denig (2000)	

Económico	Inversión inicial elevada	Equipos de bajo rendimiento	Bianchini & Simioni (2021) Sfeir <i>et al.</i> (2021)
	Mejoras a secadores	Ingresos adicionales	Smith (2023)
Ambiental	Todas las anteriores	Emisiones de GEI	Simo-Tagne & Ndi-Azese (2021) Motevali & Tabatabaee Kolor (2017)

1.2.1. Limitaciones energéticas

Entre las principales limitaciones del tipo energético que se pueden presentar durante los procesos de secado, están la propia antigüedad de los secadores. Esta antigüedad de los equipos de secado en aserraderos de países en desarrollo a menudo se traduce en un consumo ineficiente de energía (Nzotcha & Kenfack, 2019), y es en parte a que carecen de las tecnologías modernas de eficiencia energética, lo que resulta en un mayor gasto de recursos, contribuyendo a costos operativos elevados y emisiones innecesarias de gases de efecto invernadero (Vigants *et al.*, 2015).

La elección de la fuente de energía a utilizar dependerá de varios factores, incluyendo la escala de la operación, la disponibilidad y costo de los recursos locales, y de las consideraciones ambientales y la infraestructura energética existente. Hernández-Palafox (2014) menciona que el mayor problema en los secadores de madera es el alto consumo de combustible requerido para el secado, y es debido a las pérdidas de energía calorífica en las paredes del secador, lo que disminuye la temperatura del aire. En ese sentido, Awadalla *et al.* (2004) mencionan que la energía requerida para secar madera en secadores convencionales oscila entre 600 y 1000 kWh/m³, dependiendo del tipo y espesor de la madera. Más aún, cuando se trata del empleo de energía externa para el proceso del secado, sólo los secadores alimentados por “calor residual” (por ejemplo digestores de biogás) son factibles en la práctica (Brummack *et al.*, 2015). Es por eso que en países en desarrollo por simplicidad y economía, los secadores solares de madera, especialmente el tipo de invernadero simple, son una tecnología adecuada para

importantes ahorros energéticos (Pirasteh *et al.*, 2014). No obstante, la elección de un tipo de secador u otro dependerá de las necesidades específicas y las condiciones del entorno. Varios trabajos científicos destacan la eficiencia energética de distintos tipos de secadores y sus aplicaciones en industrias agroalimentarias y forestales (Devani & Setty, 2019; Ahmadi *et al.*, 2021; Yan *et al.*, 2022).

Otra limitación energética durante el secado de madera es la duración prolongada del proceso. Incluso en muestras pequeñas de laboratorio, el secado puede ser una actividad tardada. Por ejemplo, el secado convencional de secciones estándar de varios metros puede llevar semanas, afectando la economía de la oferta y demanda en las industrias de ingeniería y construcción (Oloyede & Groombridge, 2000). También, para operaciones de gasificación en Uganda se han reportado duraciones de secado de madera de eucalipto de tres y seis meses para abastecer la demanda energética de sus operaciones (Da Silva *et al.*, 2007).

En la Figura 1.1 se ejemplifica el consumo de energía por operación unitaria (% del total de energía consumida) requerida en una fábrica que produce pélets. Autores como Zhang & Liu (2006), mencionan que el proceso de secado consume aproximadamente del 40 al 70% de la energía total en un proceso típico de fabricación de productos de madera. Este secado prolongado realizado por métodos convencionales por tanto suele requerir más tiempo y energía, por lo que puede aumentar los costos operativos y tener un impacto ambiental negativo, especialmente en países en desarrollo donde los recursos energéticos pueden ser limitados.

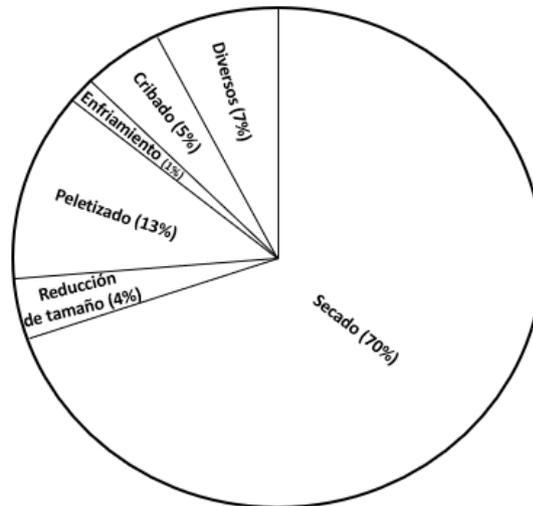


Figura 1. 1. Consumo de energía de cada operación unitaria en una industria de pélets. De acuerdo con Pirraglia *et al.* (2010).

Por otro lado, los equipos de secado más antiguos a menudo presentan deficiencias en el aislamiento y sistemas de retención de calor. Esto resulta en pérdidas significativas de calor durante el proceso de secado de biomasa. Por ejemplo, Erbay & Icier (2009) reportaron una pérdida de exergía de entre 0.95% y 3.84% en un secador de bandejas con un aislamiento hermético excelente, contra un 10.50% - 19.88% reportado en un estudio similar con un secador de aislamiento pobre (Erbay, 2008). Esto demuestra la importancia del aislamiento y hermeticidad en los secadores. La ineficacia en la retención térmica debida al mal aislamiento del secador no solo afecta la velocidad del proceso, sino que también agrega costos adicionales al requerir más energía para mantener las condiciones de secado adecuadas (Kemp, 2012), es decir, incrementar la eficiencia del secador. En la Figura 1.2 muestra cómo se suman las diferentes pérdidas en un secador convectivo típico calentado con vapor, combinando las pérdidas del secador. En este aspecto, Kemp (2012) menciona que aun cuando un secador convectivo típico, incluso si está bien diseñado y operado, puede tener una eficiencia inferior al 50%.

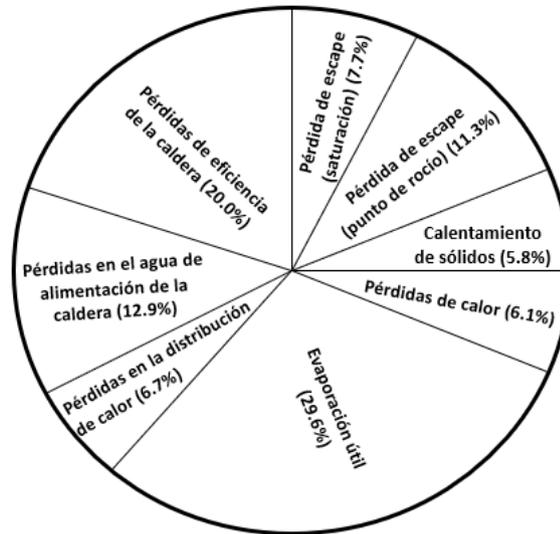


Figura 1. 2. Desglose del uso total de calor como combustible para un secador convectivo típico calentado con vapor, suponiendo una pérdida de distribución de vapor del 10% y retorno de condensado a 90 °C. De acuerdo con Kemp (2012).

Estos desafíos subrayan la importancia de buscar soluciones que mejoren la eficiencia energética en el secado de biomasa energética, como la adopción de tecnologías más eficientes o la incorporación de fuentes de energía renovable (Butler *et al.*, 2015; Velázquez-Martí, 2018).

1.2.2. Limitaciones tecnológicas

La tecnología asociada con los secadores de madera ha avanzado significativamente en las últimas décadas, y los fabricantes continúan trabajando en soluciones para abordar diversos desafíos. Además, la búsqueda de métodos más sostenibles y eficientes impulsan la innovación en este campo. Sin embargo, entre esas limitantes se encuentra la tecnología obsoleta de los secadores, la cual limita la capacidad de controlar y ajustar precisamente las condiciones de secado (Briens *et al.*, 2008).

La falta de sistemas de monitoreo y regulación avanzados dificulta la optimización de variables clave, como la temperatura y la humedad, lo que resulta en una calidad inconsistente del producto final y, en algunos casos, en la pérdida de la materia prima (Li *et al.*, 2011). En la Figura 1.3 se puede observar un “registrador de horno” empleado en un aserradero en la ciudad de Durango, México. Estos instrumentos que usan papel son empleados para registrar y

monitorear las condiciones dentro de un horno o secador. Se pueden evidenciar las limitaciones en la recopilación de datos, mayor propensión a errores humanos y la menor eficiencia. Sin embargo, son de costo inicial más bajo, facilidad de uso y la independencia de la energía para su uso.



Figura 1. 3. Registro de un secador antiguo en el estado de Durango, México. La recopilación de datos es limitada, propensa a errores humanos y a las condiciones físicas del lugar en el que se encuentra.

La disponibilidad de computadoras de proceso, avances en técnicas de modelado de secadores y mejoras en la tecnología de sensores ha aumentado el uso de sistemas de control que combinan la retroalimentación y la alimentación anticipada (Dufour, 2006). Ejemplo de ello, es el trabajo de Tamme (2023), quien desarrolló sensores específicos utilizados para el monitoreo del secado de la madera y para establecer un régimen inicial de secado, el cual luego puede ser optimizado aún más. Por su parte, Mende & Shurupov (2015), crearon una cámara de secado sencilla que en todo momento de secado no requiere la intervención del operador y la automatización del proceso se logra mediante el uso de un régimen de secado cíclico. Mientras que Gattani *et al.* (2005) emplearon técnicas de Control de Procesos de Ingeniería (EPC) para reducir la variabilidad en la velocidad de secado de la madera en hornos secadores comerciales, demostrando una reducción significativa en la variabilidad y tiempo de secado al adoptar métodos de control de retroalimentación. No obstante, existen otras diversas técnicas

experimentales para monitorear y controlar las condiciones durante el secado como lo menciona en su trabajo Aghbashlo *et al.* (2014).

También, la obsolescencia de los secadores de biomasa energética conlleva a problemas recurrentes de mantenimiento. El mantenimiento de todo el equipo es una de las medidas básicas para garantizar la mínima pérdida de energía (Gorišek & Straže, 2010). La falta de repuestos actualizados y la dificultad para encontrar profesionales capacitados para reparaciones específicas pueden resultar en tiempos de inactividad prolongados (Calvo & Domingo, 2021). Esto no solo afecta la productividad, sino que también incrementa los costos asociados con reparaciones constantes. Un ejemplo de esto es cuando se emplean técnicas sofisticadas de secado, como el secado de frecuencia ultra alta, en el que las unidades de proceso son de alto costo y diseño sofisticado, además de ser caras de mantener y de dar servicio. Por tanto, las fallas del generador de frecuencia ultra alta y su reemplazo resultan en altas pérdidas de material (Aipov *et al.*, 2019). Otro ejemplo son los secadores de bandeja, en los que las deformaciones de estas pueden provocar una distribución deficiente del aire de secado, y por ende, un rendimiento deficiente del secador (Mujumdar, 2000). Bianchini & Simioni (2021), en su trabajo, presentan una evaluación de una industria local que seca astillas de madera utilizando un secador rotatorio, considerando un 10% como gastos adicionales el mantenimiento del secador y vehículos que participan en el proceso de secado, lo cual se tradujo en cantidades de \$63,173.15, \$50,538.52 y \$37,903.89 dólares americanos por año en tres escenarios planteados. Sreekumar (2010), también consideraron un 10% el costo anual de las cantidades asociadas al mantenimiento de un secador solar.

El control de los procesos de secado se basa en el tiempo utilizado por procesos de secado anteriores, es decir, por la experiencia a través de un enfoque conocido como “bien ajustado”, para el cual se espera lograr el contenido de humedad final deseado (Baranski, 2017). Esto, a menudo conduce a un secado excesivo o a un secado incompleto de la madera y a defectos en el material. Este

período de secado considerado tardado puede conducir a una distribución desigual de la humedad dentro de la madera.

Por último, el secado prolongado puede disminuir la capacidad de producción, ya que los ciclos de secado más largos reducen la rotación del equipo y la disponibilidad de espacio de almacenamiento para preservar la calidad del material (Brummack *et al.*, 2015). Esto puede afectar la capacidad de la planta para procesar cantidades significativas de biomasa en un periodo dado.

1.2.3. Limitaciones económicas

Las limitaciones económicas en los procesos de secado de la madera pueden abordarse desde varios aspectos que afectan los costos y la rentabilidad de la operación. Entre algunas de estas limitantes se encuentran la inversión inicial alta, los costos de la energía a utilizar, el mantenimiento y las reparaciones de los secadores, la eficiencia energética, el tiempo de secado, el control del proceso, la calidad del producto, e incluso las fluctuaciones en los precios de la madera, ya que si los precios de la materia prima son volátiles, esto puede afectar la planificación económica a largo plazo (Bianchini & Simioni, 2021; Sfeir *et al.*, 2021).

Cabe destacar que los costos relacionados con la mejora de cualquier tipo de secador varían en función del tipo de secador y de la empresa proveedora de las mejoras. Por ejemplo, al mejorar el control de un secador rotativo de gran tonelaje que procesa productos agrícolas y aumentar el contenido de humedad promedio en un 1% resultaría en ingresos adicionales de \$500,000.00 dólares americanos por secador por año (Robinson, 1992). En los secadores de tableros Denig (2000) menciona que en un secado ineficiente, los costos por pérdida de calidad pueden superar fácilmente todos los demás gastos combinados, llegando a 100 dólares americanos por mil pies de tabla. Mientras que, en operaciones de alta calidad, estos costos pueden ser mucho menores, alrededor de 15 dólares americanos por mil pies de tabla, y gran parte de la pérdida se debe a la calidad natural de la madera, no a los procedimientos de secado.

En secadores por convección mal diseñados, el costo anual de la electricidad desperdiciada puede representar un porcentaje significativo del costo total inicial

del sistema de secado (Smith, 2023). Para ello, un modelado geométrico y un análisis de dinámica de fluidos computacional (CFD) adecuados pueden prever con precisión estos costos antes de la construcción del sistema de secado. Sin embargo, el valor para la energía eléctrica particularmente depende de cómo se genere, es decir, de una combinación de tecnologías que puede variar de un país a otro. En la práctica, los valores típicos son de 0.4 a 0.6 kg/kWh para Europa, 0.6 kg/kWh para América del Norte, y de 0.8 a 1.0 kg/kWh para países en desarrollo, aunque con excepciones significativas (Kemp, 2012).

También, el aumento en el tiempo de secado no solo implica mayores costos energéticos, sino también mayores costos operativos en términos de mano de obra, mantenimiento de equipos y almacenamiento de material. Ejemplo de esto, son los secadores de bandejas, los cuales requieren una gran cantidad de mano de obra para cargar y descargar el producto, con tiempos de secado largos que van desde 10 horas hasta 60 horas (Devahastin & Mujumdar, 2006). Este aumento en mano de obra implica que los trabajadores de las industrias madereras dediquen más horas a supervisar y gestionar los secadores, lo cual evidentemente resulta en mayores costos salariales directos. Como referencia, en una fábrica de madera en los Estados Unidos, los trabajadores reciben un pago de 24 dólares por hora para realizar la carga y descarga de un horno convencional con una capacidad de 75 metros cúbicos durante un período de 5 horas (Elustondo *et al.*, 2005). De manera contraria, en comunidades que realizan el secado mediante tecnologías tradicionales, esta mano de obra requerida para el funcionamiento y mantenimiento de los secadores es impuesta por los propios artesanos.

1.2.4. Limitaciones ambientales

La combinación de un alto consumo de energía, problemas de mantenimiento, pérdida de calor y control limitado del procedimiento contribuye directamente al impacto ambiental negativo. Los impactos ambientales de cualquier tipo de secador deben tenerse en cuenta para su selección, además de su rendimiento técnico-económico tradicional (Haque & Somerville, 2013).

En ese sentido, Dahlen *et al.* (2011) secaron madera de pino en un horno resaltando que al secar desde un contenido de humedad del 19 al 8%, las emisiones de metanol y formaldehído aumentaron en promedio un 48 y un 52%, respectivamente. Mientras que las emisiones de metanol, formaldehído y compuestos orgánicos volátiles totales se informaron de acuerdo con los estándares. También, Milota (2013) secaron madera de pino, abeto y táscate hasta obtener contenidos de humedad finales de 10-25% con un secador de tambor rotatorio, reportando emisiones totales de hidrocarburos de entre 0.10 y 0.25 g/kg de biomasa seca al horno hasta 6.9 g/kg, emisiones de etanol de entre 7,621 y 2,591 mg/kg, y emisiones de ácido acético en un rango de 237-246 mg/kg en pino fresco.

Como parte de la solución a la reducción en la emisión de contaminantes atmosféricos, los secadores solares de madera son una alternativa valiosa y sostenible en comparación con otros métodos de secado convencionales (Simo-Tagne & Ndi-Azese, 2021). Entre las razones que resaltan la importancia de los secadores de madera están su contribución a la sostenibilidad ambiental, son de costos operativos reducidos, accesibilidad en áreas remotas (especialmente importante para comunidades en áreas rurales o en desarrollo), son de bajo impacto ambiental, tienen aplicación en pequeña escala, aprovechan los recursos locales, poseen menor dependencia de combustibles importados, y su versatilidad y adaptabilidad en su aplicación (Pirasteh *et al.*, 2014). En su estudio, López-Sosa *et al.* (2019) a través de un análisis del ciclo de vida (LCA) revelaron que un nuevo prototipo de secador de madera solar tiene impactos ambientales de un 5% o menores que los de un secador tradicional de ladrillo utilizado en una comunidad rural en el estado de Michoacán, México. Por su parte, Simo-Tagne & Ndi-Azese (2021) construyeron un secador solar de una capacidad de siete metros cúbicos, que funcionando durante todo el año, es capaz de reducir la producción de contaminantes en aproximadamente 26 toneladas de CO₂ en una región de Francia, y 58 toneladas de CO₂ en una región de Camerún.

Haque & Somerville (2013) como parte de su trabajo evaluaron las emisiones de CO₂ de diversos tipos de secadores, resaltando que el potencial de calentamiento global del proceso de secado de biomasa es de 9.2 kg de CO₂-e por tonelada de biomasa seca. Si esta biomasa seca se utiliza en una central eléctrica como combustible para una caldera de vapor, existe un significativo potencial de reducción de las emisiones de CO₂ en comparación con una planta de energía típica alimentada con carbón debido al cambio de combustible. Por tanto, las emisiones innecesarias de gases de efecto invernadero, la generación de residuos y la ineficiente utilización de recursos naturales subrayan la urgencia de actualizar los equipos de secado para alinearlos con prácticas más sostenibles y amigables con el medio ambiente (Simo-Tagne & Ndi-Azese, 2021).

Debido a la alta demanda y la considerable proporción de biomasa utilizada como fuente de energía en los países en desarrollo, es crucial avanzar en el desarrollo de secadores eficientes para su procesamiento (Pirasteh *et al.*, 2014). Estos dispositivos deben ser tanto económicamente viables como respetuosos con el medio ambiente, garantizando un proceso de secado eficaz que optimice el uso de esta importante fuente de energía renovable.

1.3. Perspectivas actuales de investigación en el secado de biomasa energética

Una variable importante en el proceso de secado es el tiempo que tardará el proceso, ya que existe incertidumbre en las condiciones del aire (Sychevskii, 2018). La capacidad de predecir el tiempo necesario para secar la biomasa variando los factores que influyen en el proceso proporciona información valiosa para mejorar y adecuar los secadores que se utilizan actualmente. Hay varios factores que influyen en el tiempo para el secado, tamaño y porosidad del material a secar, temperatura aplicada, velocidad del flujo de aire y la humedad inicial de la materia a secar.

Las curvas empíricas para describir el secado son limitadas, por lo que se buscan modelos generales basados en transferencia de calor y masa para predecir la velocidad de secado en diversas condiciones antes del proceso (Konopka *et al.*, 2021). Sin embargo, los modelos para predecir el tiempo de secado en industrias

a menudo difieren de los resultados experimentales debido a factores como la velocidad y el número de Reynolds en los espacios entre las astillas de madera, la geometría de las piezas, porosidad, y la longitud característica, lo que causa discrepancias significativas con los datos reales (Jalili *et al.*, 2013).

Investigaciones recientes sobre la modelización de la cinética de secado, centrados en los procesos de transferencia de calor y masa, han destacado la relevancia de anticipar el tiempo necesario para el secado. Se ha demostrado que modelos matemáticos y curvas experimentales pueden ser útiles para comprender y mejorar este proceso. Por ejemplo, estudios como los de Khamtree *et al.* (2020), San José *et al.* (2021), Zohrabi *et al.* (2020) y Brys *et al.* (2021), han revelado que el secado a temperaturas altas y con velocidades de flujo de aire mayores resultan en tiempos de secado más cortos y una mayor velocidad de secado.

Además, se ha explorado el uso de tecnologías como la irradiación de microondas y el calentamiento por radiación-convección para acelerar el secado de la biomasa energética (Aniszewska *et al.*, 2021). Estas técnicas han demostrado ser efectivas, especialmente al reducir el contenido de humedad de la biomasa y compactarla para aumentar la densidad y mejorar la eficiencia del proceso sin costos adicionales (Syrodoy *et al.*, 2023).

Por otro lado, la comparación entre métodos de secado como convección e infrarrojo ha revelado diferencias significativas en cuanto a la velocidad y eficiencia del proceso (Straže *et al.*, 2020). Se ha observado que el secado por infrarrojo puede ser hasta cinco veces más rápido que el secado por convección, destacando la influencia de la temperatura en la eficacia del secado (Pryce *et al.*, 2020). Por ejemplo, Kuznetsov *et al.* (2021) demostraron experimentalmente la formación de campos de temperatura no uniformes durante el secado de biomasa energética, o que destaca la complejidad de los procesos de transferencia de calor y masa que ocurren paralelamente bajo condiciones de conducción de calor, transformaciones de fase, y difusión de vapor de agua través de la estructura porosa de la capa de biomasa. Esta complejidad se aborda de manera eficiente en estudios como los de Reineking *et al.* (2024) quienes compararon métodos de simulación y encontraron

que los Modelos Reducidos ofrecen resultados precisos y reducen significativamente el tiempo de simulación en el secado de astillas de madera.

En trabajos como los de Skarbalius *et al.* (2022) se ha observado que la velocidad de secado está directamente relacionada con el flujo de aire de entrada y varía según el contenido de humedad inicial de las astillas energéticas, aunque no siempre del volumen del lecho de secado. Ejemplo de esto fue presentado por Sileshi *et al.* (2022), quienes estudiaron la influencia del flujo de aire a través de la dinámica computacional de fluidos en la calidad del producto final durante el secado, encontrando que la implementación de un canal vertical puede mejorar significativamente la distribución del aire y la homogeneidad del material.

De igual manera, investigaciones han revelado que niveles bajos de humedad en la biomasa pueden incrementar el riesgo de explosiones en sistemas de secado que utilizan vapor sobrecalentado (Adamski *et al.*, 2021). Por otro lado, modelos de resistencia a la presión durante el secado de astillas energéticas han sugerido que la utilización de partículas más grandes y uniformes ayuda a seleccionar una ventilación adecuada y ajustar los parámetros del proceso, evitando el sobredimensionamiento de secadores (Kuptz & Hartmann, 2021). También, se ha demostrado la viabilidad de los secadores solares de astillas de madera empleando temperaturas moderadas, lo cual resulta beneficioso para evitar posibles daños físicos y pérdidas de volátiles durante el proceso (Raitila & Tsupari, 2020).

Por su parte, Kumar *et al.* (2023) desarrollaron un secador solar con convección forzada y utilizaron redes neuronales para predecir la humedad final de diferentes tipos de madera y determinar su curva de secado, logrando eficiencias térmicas y exergéticas destacables. Este enfoque innovador destaca la importancia de la tecnología en la optimización de procesos de secado. Además, Francik *et al.* (2018) establecieron modelos precisos de secado de astillas de sauce para diferentes niveles de humedad mediante redes neuronales artificiales y validados con datos experimentales, lo que resalta la utilidad de la inteligencia artificial en este campo.

Sin embargo, a pesar de los avances, persisten los desafíos en la predicción de la humedad durante el secado. Por ejemplo, el método gravimétrico es preciso pero lento, mientras que los métodos indirectos como la espectroscopia NIR son más rápidos (Liang *et al.*, 2019; Amaral *et al.*, 2020; Toscano *et al.*, 2022). La variabilidad de las astillas energéticas en su caso y la dificultad en etiquetar datos son desafíos, por lo que se sugiere el uso de visión artificial y redes neuronales para mejorar la precisión en tiempo real (Rahman *et al.*, 2024). Ésta variabilidad y complejidad se aborda en estudios como los de Ahmadinia *et al.* (2022), quienes analizaron cómo diferentes variables afectan la velocidad de secado de astillas de madera, destacando la influencia de la temperatura, humedad relativa, y porosidad.

Los avances en la investigación sobre el secado de biomasa energética han permitido identificar factores clave, desarrollar modelos predictivos y explorar nuevas tecnologías como las redes neuronales para mejorar la eficiencia y la velocidad de este proceso industrialmente relevante. La combinación de enfoques experimentales y modelos computacionales avanzados ofrece un panorama completo para abordar los desafíos y oportunidades en este campo de investigación. Sin embargo, aunque se ha investigado bastante sobre estos factores que influyen sobre el secado de las astillas energéticas, todavía hay un déficit en los esfuerzos, a pesar de que su importancia está en aumento debido a la creciente demanda de recursos energéticos renovables (D'Adamo *et al.*, 2020).

Además, la precisión en la medición es cada vez más importante para estimar el costo total de producción y uso de combustibles renovables, así como para cuantificar las emisiones dañinas para el medio ambiente (Pedišius *et al.*, 2021). Aumentar la producción de astillas de madera certificadas y su uso en la generación de energía, junto con la mejora de las tecnologías de producción de energía utilizando biocombustibles de calidad diversa, puede impulsar la expansión del uso de recursos bioenergéticos para la producción de energía sostenible, lo que contribuye al desarrollo de nuevas estrategias que impulsen la sostenibilidad y la productividad en este campo (D'Adamo *et al.*, 2021).

1.4. Referencias bibliográficas de introducción y antecedentes

- Adamski, R., Siuta, D., Kukfisz, B., Mitkowski, P. T., & Szaferski, W. (2021). Influence of process parameters in superheated steam drying on fire and explosion parameters of woody biomass. *Fuel Processing Technology*, 211, 106597. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2020.106597>
- Aghbashlo, M., Sotudeh-Gharebagh, R., Zarghami, R., Mujumdar, A. S., & Mostoufi, N. (2014). Measurement techniques to monitor and control fluidization quality in fluidized bed dryers: A review. *Drying Technology*, 32(9), 1005–1051. <https://doi.org/10.1080/07373937.2014.899250>
- Ahmadi, A., Biplab, D., Ehyaei, M. A., Esmaeilion, F., El Haj Assad, M., Jamali, D. H., Kooshhekan, O., Kumar, R., Rosen, M. A., Negi, S., Sekhar Bhogilla, S., & Safari, S. (2021). Energy, exergy, and techno-economic performance analyses of solar dryers for agro products: A comprehensive review. *Solar Energy*, 228, 349–373.
- Ahmadinia, S., Palviainen, M., Kiuru, P., Routa, J., Sikanen, L., Urzainki, I., & Laurén, A. (2022). Forest chip drying in self-heating piles during storage as affected by temperature and relative humidity conditions. *Fuel*, 324, 124419. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124419>
- Aipov, R. S., Gabitov, I. I., Tuhvatullin, M. I., Linenko, A. V., Tuktarov, M. F., & Akhmetshin, A. T. (2019). Process unit for drying sawn timber rotating in the ultra high frequency field with a discrete arrangement of magnetrons. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 25(2012), 3–11.
- Amaral, E. A., Santos, L. M., Costa, E. V. S., Trugilho, P. F., & Hein, P. R. G. (2020). Estimation of moisture in wood chips by near infrared spectroscopy. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 22(3), 291–302. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2020005000304>
- Aniszewska, M., Słowiński, K., Tulska, E., & Zychowicz, W. (2021). Effects of microwave irradiation on the moisture content of various wood chip fractions obtained from different tree species. *Journal of Wood Science*, 67(28), 1-11. <https://doi.org/10.1186/s10086-021-01958-8>
- Areo, O. S., Omole, A. O., Adejoba, A. L., & Agu, V. I. (2023). Factors influencing wood modification in Nigeria. *Ethiopian Journal of Environmental Studies & Management*, 16(3), 266–275.
- Awadalla, H. S. F., El-Dib, A. F., Mohamad, M. A., Reuss, M., & Hussein, H. M. S. (2004). Mathematical modelling and experimental verification of wood drying process. *Energy Conversion and Management*, 45(2), 197–207. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(03\)00146-8](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(03)00146-8)
- Baranski, J. (2017). Moisture content during and after high- and normal-temperature

- drying processes of wood. *Drying Technology*, 36(6), 751–761. <https://doi.org/10.1080/07373937.2017.1355319>
- Barasa, B., Turyabanawe, L., Akello, G., Gudoyi, P. M., Nabatta, C., Mulabbi, A., & Bellucci, S. (2022). The energy potential of harvested wood fuel by refugees in Northern Uganda. *The Scientific World Journal*, 569960, 1-10. <https://doi.org/10.1155/2022/1569960>
- Bengtsson, P. (2008). Experimental analysis of low-temperature bed drying of wooden biomass particles. *Drying Technology*, 26(5), 602–610. <https://doi.org/10.1080/07373930801946726>
- Bergues Ricardo, C. C., & Díaz López, J. R. (2014). Diagramas de tendencia para la generalización sostenible de secadores solares directos de productos agropecuarios. *Tecnología Química*, 34(2), 178–188.
- Bergues Ricardo, C. C., Bèrriz Pèrez, L., & Griñán Villafañe, P. (2010). Generalización de secadores solares directos en Cuba. Análisis numérico de sus tendencias actuales. *DELOS: Desarrollo Local Sostenible*, 3(8), 9. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3240529>
- Bergues Ricardo, C. C., Griñán Vallafañe, P., & Martínez Reyes, A. (2008). Algunos aspectos de los cambios tecnológicos en secadores solares cubanos: Realidades y tendencias. *Tecnología Química*, XXVIII(2), 35–45.
- Bianchini, D. C., & Simioni, F. J. (2021). Economic and risk assessment of industrial wood chip drying. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 44, 101016. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101016>
- Bond, B. H., & Espinoza, O. (2016). A decade of improved lumber drying technology. *Current Forestry Reports*, 2(2), 106–118. <https://doi.org/10.1007/s40725-016-0034-z>
- Briens, L., Smith, R., & Briens, C. (2008). Monitoring of a rotary dryer using acoustic emissions. *Powder Technology*, 181(2), 115–120. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2006.12.004>
- Brummack, J., Umbach, M., Weichelt, K., & Seifert, A. (2015). Drying and preparation of wood chips from short rotation coppice. In *Bioenergy from Dendromass for the Sustainable Development of Rural Areas* (pp. 447–468).
- Bryś, A., Kaleta, A., Górnicki, K., Głowacki, S., Tulej, W., Bryś, J., & Wichowski, P. (2021). Some aspects of the modelling of thin-layer drying of sawdust. *Energies*, 14(3), 726. <https://doi.org/10.3390/en14030726>
- Butler Manning, D., Bemann, A., Bredemeier, M., Lamersdorf, N., & Ammer, C. (2015). *Bioenergy from dendromass for the sustainable development of rural areas* (D. Butler Manning, A. Bemann, M. Bredemeier, N. Lamersdorf, & C.

- Ammer (eds.); First). Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. <https://doi.org/10.1002/9783527682973>
- Cai, L., & Oliveira, L. C. (2008). Impact of high-temperature schedules on drying of spruce and Pine. *Drying Technology*, 26(9), 1160–1164. <https://doi.org/10.1080/07373930802266280>
- Calvo, L. M., & Domingo, R. (2021). Influence of maintenance actions in the drying stage of a paper mill on CO₂ emissions. *Processes*, 9(10), 1–20. <https://doi.org/10.3390/pr9101707>
- Chandra Mohan, V. P., & Talukdar, P. (2010). Three dimensional numerical modeling of simultaneous heat and moisture transfer in a moist object subjected to convective drying. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53(21–22), 4638–4650. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.06.029>
- Chua, K. J., & Chou, S. K. (2003). Low-cost drying methods for developing countries. *Trends in Food Science and Technology*, 14(12), 519–528. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2003.07.003>
- D'Adamo, I., Falcone, P. M., Huisingh, D., & Morone, P. (2021). A circular economy model based on biomethane: What are the opportunities for the municipality of Rome and beyond? *Renewable Energy*, 163, 1660–1672. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.10.072>
- D'Adamo, I., Falcone, P. M., & Morone, P. (2020). A new socio-economic indicator to measure the performance of bioeconomy sectors in Europe. *Ecological Economics*, 176, 106724. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2020.106724>
- Da Silva, I. P., Buchholz, T., Okure, M., & Kjellström, B. (2007). Wood gasification in Uganda – is this a solution for the energy crisis? hard facts from installed units. *East African Power Industry Conference*.
- Dahlen, J., Prewitt, L., Shmulsky, R., & Jones, D. (2011). Hazardous air pollutants and volatile organic compounds emitted during kiln drying of southern pine lumber to interior and export moisture specifications. *Forest Products Journal*, 61(3), 229–234. <https://doi.org/10.13073/0015-7473-61.3.229>
- Denig, J. (2000). *Drying hardwood lumber* (F. P. L. U.S. Department of Agriculture, Forest Service (ed.); University).
- Devahastin, S., & Mujumdar, A. S. (2006). Indirect dryers. In A. S. Mujumdar (Ed.), *Handbook of industrial drying* (Fourth, pp. 127–137). CRC Press - Taylor & Francis Group.
- Devani, Y., & Setty, P. (2019). Energetic and exergetic analyses of Barnyard millet drying using continuous multistage fluidized bed dryer. *Journal of Food Process Engineering*, 1–13. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13247>

- Dufour, P. (2006). Control engineering in drying technology: Review and trends. *Drying Technology*, 24(7), 889–904. <https://doi.org/10.1080/07373930600734075>
- Dzurenda, L., & Deliiski, N. (2012). Convective drying of beech lumber without color changes of wood. *Drvna Industrija*, 63(2), 95–103. <https://doi.org/10.5552/drind.2012.1135>
- Elustondo, D., Avramidis, S., & Zwick, R. (2005). The demonstration of increased lumber value using optimized lumber sorting and radio frequency vacuum drying. *Forest Products Journal*, 55(1), 76–83.
- Erbay, Z. (2008). *The investigation of modeling, optimization, and exergetic analysis of drying of olive leaves*. Ege University.
- Erbay, Z., & Icier, F. (2009). Optimization of drying of olive leaves in a pilot-scale heat pump dryer. *Drying Technology*, 27(3), 416–427. <https://doi.org/10.1080/07373930802683021>
- Francik, S., Łapczyńska-Kordon, B., Francik, R., & Wójcik, A. (2018). Modeling and simulation of biomass drying using artificial neural networks. In K. Mudryk & S. Werle (Eds.), *Renewable Energy Sources: Engineering, Technology, Innovation* (pp. 571–581). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-72371-6_56
- Gattani, N., del Castillo, E., Ray, C. D., & Blankenhorn, P. R. (2005). Time series analysis and control of a dry kiln. *Wood and Fiber Science*, 37(3), 472–483.
- Gorišek, Ž., & Straže, A. (2010). Optimization of energy consumption and costs of wood drying with use of different drying techniques. *Zbornik Gozdarstva in Lesarstva*, 92, 57–66.
- Griñán Egea, S. (2020). *Techno-economic analysis of the implementation of a dryer for medium-scale biomass combustion plants*. Université Libre de Bruxelles.
- Haque, N., & Somerville, M. (2013). Techno-economic and environmental evaluation of biomass dryer. *Procedia Engineering*, 56, 650–655. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.03.173>
- Hasan, M., & Langrish, T. A. G. (2016). Time-valued net energy analysis of solar kilns for wood drying: A solar thermal application. *Energy*, 96, 415–426. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.11.081>
- Hernández Palafox, E. (2014). Material de construcción para hornos de secado de madera. *Científica*, 18(4), 141–145.
- Jalili, M., Anca-Couce, A., & Zobel, N. (2013). On the uncertainty of a mathematical

- model for drying of a wood particle. *Energy and Fuels*, 27(11), 6705–6717. <https://doi.org/10.1021/ef401156s>
- Johnsson, S., Andersson, E., Thollander, P., & Karlsson, M. (2019). Energy savings and greenhouse gas mitigation potential in the Swedish wood industry. *Energy*, 187, 115919. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.115919>
- Katila, P., Colfer, C. J. P., de Jong, W., Galloway, G., Pacheco, P., & Winkel, G. (2019). Sustainable development goals: Their impacts on forests and people. In *Sustainable Development Goals: Their Impacts on Forests and People* (Issue December). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781108765015>
- Kemp, I. C. (2012). Fundamentals of energy analysis of dryers. In E. Tsotsas & A. S. Mujumdar (Eds.), *Modern Drying Technology Volume 4: Energy Savings* (First Edit, Vol. 4, pp. 1–45). Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. <https://doi.org/10.1002/9783527631681.ch1>
- Khamtree, S., Ratanawilai, T., Nuntadusit, C., & Marzbani, H. (2020). Experimental study and numerical modeling of heat and mass transfer in rubberwood during kiln drying. *Heat and Mass Transfer*, 57(3), 453–464. <https://doi.org/10.1007/s00231-020-02970-2>
- Konopka, A., Barański, J., Orłowski, K. A., Mikielwicz, D., & Dzurenda, L. (2021). Mathematical model of the energy consumption calculation during the pine sawn wood (*Pinus sylvestris* L.) drying process. *Wood Science and Technology*, 55(3), 741–755. <https://doi.org/10.1007/s00226-021-01276-8>
- Kumar, B., Szepesi, G., Szamosi, Z., & Krámer, G. (2023). Analysis of a combined solar drying system for wood-chips, sawdust, and pellets. *Sustainability (Switzerland)*, 15, 1791. <https://doi.org/10.3390/su15031791>
- Kuptz, D., & Hartmann, H. (2021). Prediction of air pressure resistance during the ventilation of wood chips as a function of multiple physical fuel parameters. *Biomass and Bioenergy*, 145, 105948. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105948>
- Kuznetsov, G. V., Syrodoy, S. V., Nigay, N. A., Maksimov, V. I., & Gutareva, N. Y. (2021). Features of the processes of heat and mass transfer when drying a large thickness layer of wood biomass. *Renewable Energy*, 169, 498–511. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.12.137>
- Langrish, T., & Walker, J. (2006). Drying of Timber. In *Primary wood processing: principles and practice* (pp. 251–295). [papers2://publication/uuid/BB78B56D-070F-453E-8ACD-7F6521988D2C](https://doi.org/10.1016/B978-0-08-045352-5.ch13)
- Li, Z., Raghavan, G. S. V., Wang, N., & Vigneault, C. (2011). Drying rate control in the middle stage of microwave drying. *Journal of Food Engineering*, 104(2),

234–238. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.12.014>

- Liang, L., Fang, G., Deng, Y., Wu, T., Liang, L., Xiong, Z., & Fang, G. (2019). Determination of moisture content and basic density of poplar wood chips under various moisture conditions by near-infrared spectroscopy. *Forest Science*, *65*(5), 548–555. <https://doi.org/10.1093/forsci/fxz007>
- López-Sosa, L. B., Núñez-González, J., Beltrán, A., Morales-Máximo, M., Morales-Sánchez, M., Serrano-Medrano, M., & García, C. A. (2019). A new methodology for the development of appropriate technology: A case study for the development of a wood solar dryer. *Sustainability (Switzerland)*, *11*(20), 5620. <https://doi.org/10.3390/su11205620>
- Martin, N., Anglani, N., Einstein, D., Khrushch, M., Worrell, E., & Price, L. K. (2000). *Opportunities to improve energy efficiency and reduce greenhouse gas emissions in the U.S. pulp and paper industry*. <https://escholarship.org/uc/item/31b2f7bd>
- Martynenko, A. A., & Alves Vieira, G. N. (2023). Sustainability of drying technologies: system analysis. *Sustainable Food Technology*, *1*(5), 629–640. <https://doi.org/10.1039/d3fb00080j>
- Masud, M. H., Karim, A., Ananno, A. A., & Ahmed, A. (2020). Sustainable food drying techniques in developing countries: prospects and challenges. In *Sustainable Food Drying Techniques in Developing Countries: Prospects and Challenges*. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-42476-3>
- Mende, F. F., & Shurupov, I. A. (2015). Simple camera for high-quality wood drying. *Engineering and Technology*, *2*(3), 95–117.
- Milota, M. R. (2013). Emissions from biomass in a rotary dryer. *Forest Products Journal*, *63*(5–6), 155–161. <https://doi.org/10.13073/FPJ-D-13-00052>
- Motevali, A., & Tabatabaee Kolor, R. (2017). A comparison between pollutants and greenhouse gas emissions from operation of different dryers based on energy consumption of power plants. *Journal of Cleaner Production*, *154*, 445–461. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.219>
- Mujumdar, A. S. (2000). Classification and selection of industrial dryers. In *Mujumdar's Practical Guide to Industrial Drying: Principles, Equipment and New Developments* (Issue January 2000, pp. 23–36). Exergex Corporation. <https://doi.org/10.1615/hedhme.a.000331>
- Mujumdar, A. S. (2007). An overview of innovation in industrial drying: Current status and R&D needs. *Transport in Porous Media*, *66*(1–2), 3–18. <https://doi.org/10.1007/s11242-006-9018-y>
- Ndukwu, M. C., Bennamoun, L., & Abam, F. I. (2018). Experience of solar drying in

- Africa: Presentation of designs, operations, and models. *Food Engineering Reviews*, 10(4), 211–244. <https://doi.org/10.1007/s12393-018-9181-2>
- Nzotcha, U., & Kenfack, J. (2019). Contribution of the wood-processing industry for sustainable power generation: Viability of biomass-fuelled cogeneration in Sub-Saharan Africa. *Biomass and Bioenergy*, 120(November 2018), 324–331. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.11.015>
- Oloyede, A., & Groombridge, P. (2000). Influence of microwave heating on the mechanical properties of wood. *Journal of Materials Processing Technology*, 100(1), 67–73. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(99\)00454-9](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(99)00454-9)
- Pedišius, N., Praspaliauskas, M., Pedišius, J., & Dzenajavičienė, E. F. (2021). Analysis of wood chip characteristics for energy production in Lithuania. *Energies*, 14(13), 3931. <https://doi.org/10.3390/en14133931>
- Perré, P., & Keey, R. B. (2014). Drying of wood: Principles and practices. In *Handbook of Industrial Drying* (pp. 822–872). <https://doi.org/10.1201/b17208-44>
- Pirasteh, G., Saidur, R., Rahman, S. M. A., & Rahim, N. A. (2014). A review on development of solar drying applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, 133–148. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.11.052>
- Pirraglia, A., Gonzalez, R., & Saloni, D. (2010). Techno-economical analysis of wood pellets production for U.S. manufacturers. *BioResources*, 5(4), 2374–2390. <https://doi.org/10.15376/biores.5.4.2374-2390>
- Pryce, M. J., Cheneler, D., Martin, A., & Aiouache, F. (2020). A Comparative study of diffusion coefficients from convective and IR drying of woodchip. *Journal of Fluid Flow, Heat and Mass Transfer*, 7, 66–72. <https://doi.org/10.11159/jffhmt.2020.007>
- Rahman, A., Marufuzzaman, M., Street, J., Wooten, J., Gude, V. G., Buchanan, R., & Wang, H. (2024). A comprehensive review on wood chip moisture content assessment and prediction. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 189, p. 113843). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113843>
- Raitila, J., & Tsupari, E. (2020). Feasibility of solar-enhanced drying of woody biomass. *Bioenergy Research*, 13(1), 210–221. <https://doi.org/10.1007/s12155-019-10048-z>
- Reineking, L., Fischer, J., Mjalled, A., Illana, E., Wirtz, S., Scherer, V., & Mönnigmann, M. (2024). Convective drying of wood chips: Accelerating coupled DEM-CFD simulations with parametrized reduced single particle models. *Particuology*, 84, 158–167. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2023.03.012>

- Richter, D. D. B., Jenkins, D. H., Karakash, J. T., Knight, J., McCreery, L. R., & Nemestothy, K. P. (2009). Wood energy in America. *Science*, 323(5920), 1432–1433. <https://doi.org/10.1126/science.1166214>
- Robinson, J. W. (1992). Improve dryer control. In *Chemical Engineering Progress*, 88(12), 28–33.
- Romdhana, H., Bonazzi, C., & Esteban-Decloux, M. (2016). Computer-aided process engineering for environmental efficiency: Industrial drying of biomass. *Drying Technology*, 34(10), 1253–1269. <https://doi.org/10.1080/07373937.2015.1104348>
- San José, M. J., Alvarez, S., & López, R. (2021). Drying kinetics of sawdust in conical spouted beds: Influence of geometric and operational factors. *Fuel Processing Technology*, 221, 106950. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2021.106950>
- Scherr, S. J. (2004). Building opportunities for small-farm agroforestry to supply domestic wood markets in developing countries. *Agroforestry Systems*, 61, 357–370. https://doi.org/10.1007/978-94-017-2424-1_25
- Sfeir, T. de A., Pécora, J. E., Ruiz, A., & LeBel, L. (2021). Integrating natural wood drying and seasonal trucks' workload restrictions into forestry transportation planning. *Omega (United Kingdom)*, 98, 102135. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2019.102135>
- Sianipar, C. P. M., Yudoko, G., Dowaki, K., & Adhiutama, A. (2013). Design methodology for appropriate technology: Engineering as if people mattered. *Sustainability (Switzerland)*, 5(8), 3382–3425. <https://doi.org/10.3390/su5083382>
- Sileshi, S. T., Hassen, A. A., & Adem, K. D. (2022). Simulation of mixed-mode solar dryer with vertical air distribution channel. *Heliyon*, 8(11), e11898. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11898>
- Simo Tagne, M., Bennamoun, L., Léonard, A., & Rogaume, Y. (2020). Modeling, numerical simulation and validation of a convective dryer in steady conditions: case study of tropical woods. *International Journal of Modelling and Simulation*, 40(2), 143–161. <https://doi.org/10.1080/02286203.2019.1575111>
- Simo Tagne, M., & Ndi Azese, M. (2021). Thermal, economic, and environmental analysis of a novel solar dryer for firewood in various temperate and tropical climates. *Solar Energy*, 226, 348–364.
- Skarbalius, G., Džiugys, A., Misiulis, E., & Navakas, R. (2022). A novel method for convective drying rate estimation in a deep fixed porous material bed. *Powder Technology*, 404, 117499. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117499>

- Smith, J. E. (2023). Industrial drying industry terms, processes, and topics. In *Industrial Drying Systems: Guidelines for Agriculture, Food, and Wood Products* (pp. 321–342). Springer, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-31863-4>
- Sreekumar, A. (2010). Techno-economic analysis of a roof-integrated solar air heating system for drying fruit and vegetables. *Energy Conversion and Management*, 51(11), 2230–2238. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.03.017>
- Straže, A., Klarić, M., Budrović, Z., & Pervan, S. (2020). Characterisation and modelling of drying kinetics of thin ash and oak wood lamellas dried with infrared radiation and hot air. *Drvna Industrija*, 71(2), 171–177. <https://doi.org/10.5552/drvind.2020.1965>
- Sychevskii, V. A. (2018). Heat and mass transfer in convective wood-drying plants. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 91(3), 705–711. <https://doi.org/10.1007/s10891-018-1793-0>
- Syrodoj, S. V., Kuznetsov, G. V., Nigay, N. A., Purin, M. V., & Kostoreva, Z. A. (2023). The effect of compaction of the dispersed wood biomass layer on its drying efficiency. *Renewable Energy*, 211, 64–75. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.04.121>
- Szulecka, J. (2019). Towards sustainable wood-based energy: Evaluation and strategies for mainstreaming sustainability in the sector. *Sustainability (Switzerland)*, 11(2), 493. <https://doi.org/10.3390/su11020493>
- Tamme, H. (2023). *Development of control and optimization methods for wood drying* [Estonian University of Life Sciences]. <http://www.nber.org/papers/w16019>
- Toscano, G., Leoni, E., Gasperini, T., & Picchi, G. (2022). Performance of a portable NIR spectrometer for the determination of moisture content of industrial wood chips fuel. *Fuel*, 320, 123948.
- Unai, P., & Corbera, E. (2011). Pagos por servicios ambientales: perspectivas y experiencias innovadoras para la conservación de la naturaleza y el desarrollo rural. *Revista Española de Estudios Agrosociales y Pesqueros*, 228(1), 11–29.
- Velázquez Martí, B. (2018). *Aprovechamiento de la biomasa para uso energético* (2nd ed.). Reverté.
- Vigants, E., Vigants, G., Veidenbergs, I., Lauka, D., & Klavina, K. (2015). Analysis of energy consumption for biomass drying process. *Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference*, 2(June), 317–322. <https://doi.org/10.17770/etr2015vol2.625>

- Wang, H., Li, T., Takeuchi, R., & George, G. (2016). Corporate social responsibility: An overview and new research directions: Thematic issue on corporate social responsibility [From the Editors]. *Academy of Management Journal*, 59(2), 534–544.
- Wang, X., Qin, B., Xu, H., & Zhu, W. (2015). Rotary drying process modeling and online compensation. *Control Engineering Practice*, 41, 38–46. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2015.04.005>
- Yan, J., Wei, H., You, Z., Wu, H., Xu, X., & Xie, H. (2022). Energetic and exergetic performances during drying of freshly harvested peanut with industrial mixed-flow dryer. *Energy Reports*, 8, 7457–7467. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.05.252>
- Yi, J., Li, X., He, J., & Duan, X. (2020). Drying efficiency and product quality of biomass drying: a review. *Drying Technology*, 38(15), 2039–2054. <https://doi.org/10.1080/07373937.2019.1628772>
- Yin, Q., & Liu, H. H. (2021). Drying stress and strain of wood: A review. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(11). <https://doi.org/10.3390/app11115023>
- Zavala Zavala, D. (2016). Secado de maderas tropicales en estufas convencionales. *Madera y Bosques*, 6(1), 41–54. <https://doi.org/10.21829/myb.2000.611341>
- Zhang, B. G., & Liu, D. Y. (2006). Exploring a new developing way of wood drying technology in China. *China Forest Products Industry*, 33(4), 3–6.
- Zohrabi, S., Aghbashlo, M., Seiedlou, S. S., Scaar, H., & Mellmann, J. (2020). Energy saving in a convective dryer by using novel real-time exergy-based control schemes adjusting exhaust air recirculation. *Journal of Cleaner Production*, 257, 120394. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120394>

CAPÍTULO II. DISEÑO DEL PROTOTIPO EXPERIMENTAL DE SECADO

Para llevar a cabo los diversos tratamientos de secado de astillas de madera de pino, se construyó un secador experimental el cual se ilustra en la Figura 2.1. Está configurado como un cilindro orientado verticalmente diseñado para el proceso de desecación de material mediante la circulación de un flujo ascendente de aire caliente. La disposición vertical facilita la uniformidad en el secado, es decir, se facilita un flujo de aire más constante y uniforme alrededor de las astillas energéticas, lo que ayuda a que el secado sea más homogéneo, reduciendo la posibilidad de que ciertas áreas queden húmedas o se sequen de manera desigual. Además, esta disposición vertical presenta una mayor eficiencia en el uso de espacio en comparación con secadores tradicionales que ocupan más espacio horizontal.

El cilindro metálico tiene un diámetro de 57 cm y una altura de 89.4 cm. Un ventilador centrífugo compacto modelo PM, de capacidad de 520 a 2,680 pies cúbicos por minuto y presión de hasta 0.349 MPa, integrado en un tubo de PVC de suministro de 60 cm de longitud y 7.1 cm de diámetro, que a su vez es conectado en otro tubo de suministro dispuesto verticalmente de 18.5 cm de longitud, impulsa el aire a través del sistema. Posteriormente, este aire se calienta al pasar por resistencias, cuya potencia puede variarse para ajustar la temperatura del aire. En la salida del ventilador, una válvula de PVC de 15.8 cm de longitud regula el flujo de aire que entra en la columna de secado. El aire caliente avanza hacia un cono difusor metálico de 55.5 cm de longitud diseñado para distribuir uniformemente el aire en toda la sección transversal del cilindro. Este cono difusor se encuentra aislado con aislante térmico con aluminio y fibra de vidrio de 2 cm de grosor para prevenir cualquier pérdida de calor no deseada. Este aislamiento garantiza condiciones óptimas para la conservación y medición precisa de la temperatura y humedad relativa del aire, lo cual es crucial para los objetos de este estudio.

Después del cono difusor, se coloca una malla metálica de apertura de 2 mm con el propósito de retener las astillas de madera, evitando su caída en el cono difusor. Esta precaución se toma para prevenir problemas técnicos como obstrucción del flujo de aire o, en casos extremos, la ignición de las astillas de madera.

El sistema está equipado con sensores de temperatura y humedad analógicos modelo AMT1001 marca ASAIR® ubicados en el cono difusor, antes de que el aire encuentre las astillas de madera, y en la salida del secador. Además, se incorpora un anemómetro modelo UT363S de la marca UNI-T, que cuenta con retención de datos de rango automático, un probador de temperaturas y un medidor de velocidad del viento en un rango de 0 a 12 m/s, con una tasa de muestreo de 0.5 s. Este dispositivo se coloca antes del cono difusor para medir la velocidad del flujo de aire. Estos instrumentos de medición contribuyen a monitorear y controlar precisamente las condiciones operativas del secador experimental durante el proceso de desecación. El diagrama del secador experimental y sus componentes se ilustran en la Figura 2.2.



Figura 2. 1. Secador experimental de biomasa desarrollado y fabricado para la realización de los tratamientos de secado y la medición de pérdida de humedad en las astillas de madera de pino.

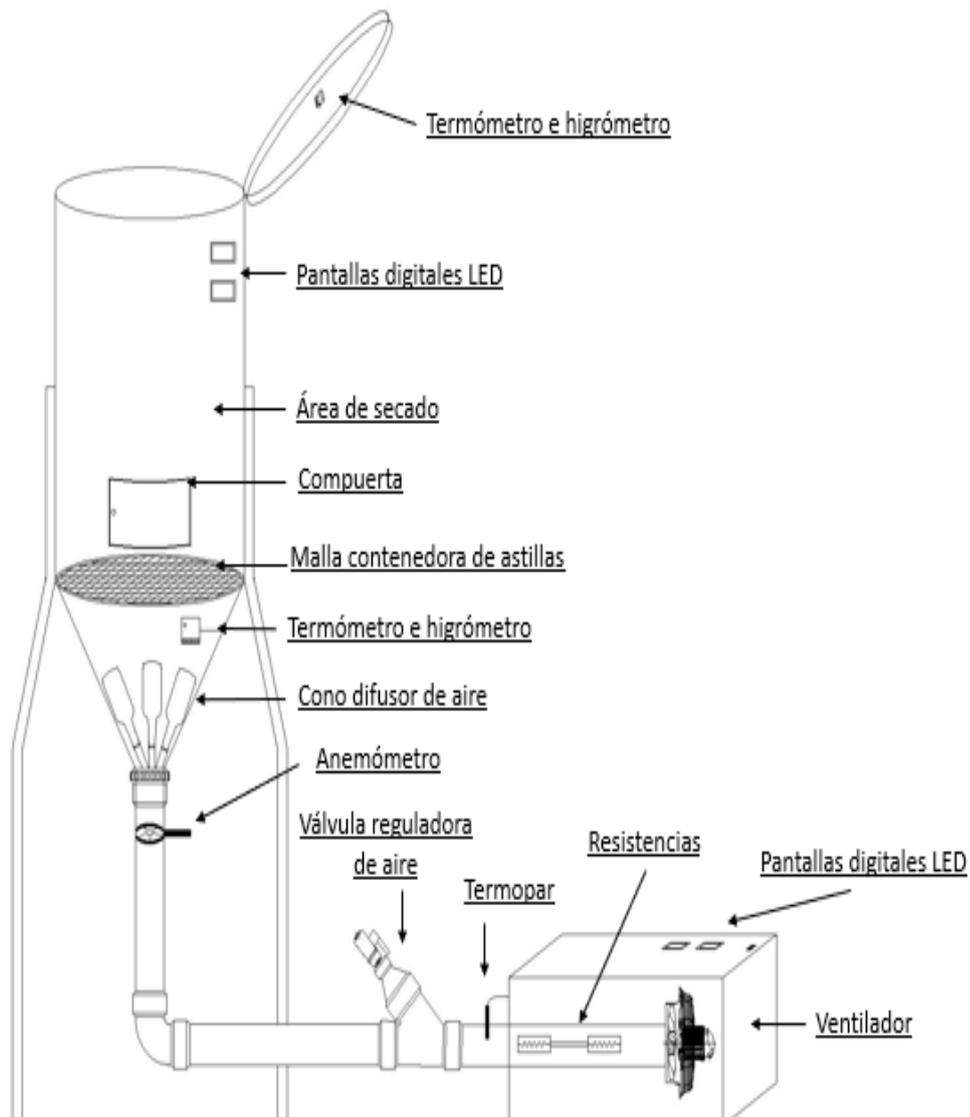


Figura 2. 2. Diagrama del secador experimental de biomasa que muestra sus componentes.

El presente prototipo experimental fue empleado como herramienta fundamental en las investigaciones posteriores contempladas en la presente tesis. Su diseño y funcionalidades específicas están concebidos para facilitar la recolección de datos y la realización de análisis que contribuirán significativamente al desarrollo de este estudio.

CAPÍTULO III. MODELOS DE TRANSFERENCIA DE MASA PARA PREDECIR LA CINÉTICA DEL SECADO CONVECTIVO DE ASTILLAS DE MADERA A PARTIR DE DIFERENTES ALTURAS DE LLENADO

3.1. Resumen

Los fenómenos de capilaridad, atracciones dipolo-dipolo y enlaces de hidrógeno hacen que la aplicación de modelos de transferencia de masa para predecir la tasa de secado por convección de aire en astillas de madera sea imprecisa. Por tanto, se requiere la modificación de estos modelos ajustando las ecuaciones. Este estudio tiene como objetivo adaptar los modelos teóricos de transferencia de masa para mejorar la predicción del tiempo de secado de astillas de *Pinus* spp. sometidas a una corriente de aire caliente con velocidad de circulación, temperatura y humedad relativa conocidas. Se construyó un dispositivo experimental para controlar las variables, donde la corriente de aire pasa verticalmente a través de un cilindro lleno de astillas de madera. Se demuestra que la tasa de secado de las astillas en un proceso convectivo con aire no es constante, sino que disminuye con el tiempo, y el contenido crítico de humedad es superior al 42%. Factores como la altura de la columna de astillas influyen en las ecuaciones predictivas para la tasa de secado. La velocidad relativa media de secado varió entre 0.063 y 0.040 g de agua $s^{-1} kg^{-1}$ de astilla seca en ambas alturas, mientras que la velocidad absoluta media de secado fue entre 0.0031 y 0.0032 g de agua s^{-1} . Se han desarrollado modificaciones de los modelos que ajustan los valores teóricos con los valores experimentales, resultando en un valor de r^2 de 0.80.

Palabras clave: astillas de madera de pino, secado convectivo, transferencia de masa, velocidad de secado

3.2. Abstract

The phenomena of capillarity, dipole-dipole attractions, and hydrogen bonding make the application of mass transfer models to predict the drying rate by air convection in wood chips imprecise. So, the modification of these models by tailoring the

equations is required. This study aims to adapt theoretical mass transfer models to improve the prediction of drying time of *Pinus* spp. chips subjected to a known hot air stream with known velocity, temperature, and relative humidity. An experimental device was constructed to control the variables, where the air stream passes vertically through a cylinder filled with wood chips. It is demonstrated that the drying rate of chips in a convective process with air is not constant but rather decreases over time, and the critical moisture content is above 42%. Factors such as height of the chips pile influence the predictive equations for the drying rate. The average relative drying rate ranged between 0.063 and 0.040 g of water s⁻¹ kg⁻¹ of dry chip in both heights, meanwhile the average absolute drying rate was between 0.0031 and 0.0032 g of water s⁻¹. Modifications of the models have been developed that adjust theoretical values with experimental values, resulting in an r² value of 0.80.

Keywords: pine wood chips, convective drying, mass transfer, drying rate

Nomenclatura

Abreviación	Significado	Abreviación	Significado
A	Área de transferencia (m ²)	Re	Número de Reynolds
$BIOT_{masa}$	Número de Biot del proceso de transferencia de masa	Sc	Número de Schmidt
D_w	Difusividad de masa (m ² s ⁻¹)	Sc_s	Número de Schmidt en la superficie de transferencia de masa
D_1	Diámetro del tubo de suministro de aire antes del cono difusor (m)	Sh	Número de Sherwood
D_2	Diámetro del cilindro (m)	T	Temperatura del aire (°C)
h	Coefficiente de transferencia de masa por convección (m s ⁻¹)	t	Tiempo del proceso de secado (s)
H	Altura de la columna de astillas (cm)	$V - v$	Velocidad del aire (m s ⁻¹)
L_c	Longitud característica (m)	v_1	Velocidad del aire medida antes de su contacto con las astillas (m s ⁻¹)
$L_{c-astillas}$	Longitud media de las astillas (m)	v_2	Velocidad del aire después de pasar la columna de astillas (m s ⁻¹)
m_i	Masa inicial de las astillas (g)		

		Uso de simbología griega	
m_f	Masa final de las astillas (g)		
m_{seca}	Masa de las astillas de madera secas (kg)	ρ	Densidad del aire (kg m ⁻³)
\bar{m}_s	Velocidad absoluta media de secado (g de agua s ⁻¹)	μ	Viscosidad dinámica (kg m ⁻¹ s ⁻¹)
\dot{m}_s	Velocidad absoluta instantánea de secado (g de agua s ⁻¹)	$\bar{\omega}$	Variación de humedad media (% s ⁻¹)
\dot{m}_s	Masa de agua eliminada por unidad de tiempo (g s ⁻¹)	$\dot{\omega}$	Variación de humedad instantánea (% s ⁻¹)
\bar{m}_w	Velocidad relativa media de secado (g de agua s ⁻¹ kg ⁻¹ de astilla seca)	ω_{aire}	Humedad absoluta del aire (kg de agua kg ⁻¹ de aire seco)
\dot{m}_w	Velocidad relativa instantánea de secado (g de agua s ⁻¹ kg ⁻¹ de astilla seca)	ω_{sat}	Humedad absoluta en la saturación (kg de agua kg ⁻¹ de aire seco)
m_1	Masa de las astillas en el tiempo t_1 (g)	ρ_{aire}	Densidad del aire (kg de aire seco m ⁻³)
m_2	Masa de las astillas en el tiempo t_2 (g)		

3.3. Introducción

La aplicación de modelos de transferencia de masa para predecir la cantidad de agua removida por unidad de tiempo en un proceso de secado convectivo con aire caliente funciona bien en películas de agua. Sin embargo, la densidad, porosidad específica y naturaleza química de la madera hacen que estos modelos sean inadecuados cuando se aplican a biomasa en astillas (Khamtree *et al.*, 2020; Koukouch *et al.*, 2020; Kuznetsov *et al.*, 2021). Este proceso es crucial en el diseño de secadores de aire caliente existiendo una incertidumbre significativa en la predicción de los tiempos de secado en la industria de la madera para condiciones específicas de flujo de aire, temperatura y humedad relativa (Sychevskii, 2018). El secado es una operación crítica en la industria de la biomasa, ya que el contenido de humedad impacta significativamente en las propiedades de los biocombustibles, como el valor calórico, la inflamabilidad y la idoneidad para la peletización o la pirólisis (Callejón-Ferre *et al.*, 2014; Velázquez-Martí, 2018).

Las curvas empíricas de relación de humedad-tiempo utilizadas para describir el proceso de secado tienden a ser menos versátiles porque sólo son

aplicables bajo condiciones específicas (Konopka *et al.*, 2021). Es por eso que los investigadores han intentado desarrollar modelos más generales basados en los principios de transferencia de masa y calor para predecir las tasas de secado bajo cualquier condición dada antes de llevar a cabo el proceso (Mołczan & Cyklis, 2023).

Los modelos de transferencia de masa establecen que el movimiento de las partículas de agua en estado de vapor en la interfaz de un medio sólido o líquido que está siendo secado ocurre por difusión, siguiendo la Ley de Fick, y por convección a través de la acción de fuerzas impulsoras (Mohan & Talukdar, 2013). Cuando hay una corriente de aire caliente capaz de absorber y transportar partículas de agua desde un medio, se asume que el aire se satura en la interfaz de la película de agua y el gas circulante. En otras palabras, tiene una humedad relativa del 100% con una humedad absoluta ω_{sat} (kg de agua kg⁻¹ de aire seco) (Chávez *et al.*, 2021). Si la corriente de aire circula con una densidad ρ_{aire} (kg de aire seco m⁻³) y una humedad absoluta ω_{aire} , la masa de agua eliminada por unidad de tiempo puede calcularse utilizando la Ecuación (1), donde h (m s⁻¹) es una constante de proporcionalidad relacionada con el área de transferencia A , conocida como el coeficiente de transferencia de masa por convección. Este coeficiente depende del número de Sherwood según la Ecuación (2), donde D_w es la difusividad de masa y L_c es la longitud característica (Velázquez-Martí, 2024).

$$\dot{m}_s = h \cdot \rho_{aire} \cdot A \cdot (\omega_{sat} - \omega_{aire}) \quad (1)$$

$$h = \frac{Sh \cdot D_w}{L_c} \quad (2)$$

El número de Sherwood (Sh) se puede calcular en función del número de Reynolds (Re) y el número de Schmidt (Sc). La relación entre el número de Sherwood, el número de Reynolds y el número de Schmidt sigue una analogía con las ecuaciones de transferencia de calor (Çengel, 2007):

$$Sh = f(Re, Sc)$$

$$Re = \frac{v \rho L_c}{\mu}$$

$$Sc = \frac{\mu}{\rho_{aire} D_w}$$

Donde v es la velocidad del aire, L_c es la longitud característica, y μ es la viscosidad dinámica del fluido.

Existen varios factores que provocan que los modelos creados para determinar el tiempo del proceso de secado difieran de los obtenidos experimentalmente en las industrias. Por ejemplo, determinar la velocidad y el número de Reynolds en los espacios entre las partículas, la geometría de las piezas y definir la longitud característica pueden llevar a variaciones significativas en comparación con los datos experimentales (Jalili *et al.*, 2013).

Se han utilizado numerosos modelos cinéticos de secado basados en procesos de transferencia de masa (Dedic, 2002; Khamtree *et al.*, 2020; Koukouch *et al.*, 2020; Kuznetsov *et al.*, 2021). Tremblay *et al.* (2000) presentaron un nuevo método experimental para determinar el coeficiente de transferencia de calor y masa por convección en la madera de *Pinus resinosa* basado en el contenido de humedad, relacionado indirectamente con el potencial hídrico en la superficie de la madera en diferentes tiempos de secado. Concluyeron que este coeficiente aumenta con la velocidad del aire y se mantiene constante hasta que el contenido de humedad en la superficie de la madera alcanza aproximadamente el 80%.

Jalili *et al.* (2013) implementaron un modelo de secado unidimensional basado en el modelo de Whitaker para secar una partícula de madera de pino de geometría cilíndrica infinita como un medio poroso, considerando las fracciones de volumen ocupadas por cada fase: mezcla de gases ε_g , sólido ε_s , agua libre ε_{fw} , y agua ligada ε_{bw} , de tal manera que:

$$\varepsilon_g + \varepsilon_s + \varepsilon_{fw} + \varepsilon_{bw} = 1$$

Concluyeron que los coeficientes de transporte del modelo en cada fase mostraron un impacto notable en el tiempo de secado predicho. Entre todas las variables, la permeabilidad intrínseca del gas fue el parámetro más significativo que afectó el modelo.

Chávez *et al.* (2021) desarrollaron un modelo que simula simultáneamente la transferencia de masa y calor a bajas temperaturas en la madera de *Pinus radiata* mientras predice las tensiones mecánicas durante el secado. Específicamente, los valores del coeficiente local de transferencia de calor " h_n " se calcularon utilizando la analogía de Colburn, lo que permitió determinar los valores en términos de los coeficientes de transferencia de masa por convección radial (S_n) y tangencial (S_w), respectivamente.

$$h_n = S_n * \left(\frac{K_n}{D_w} \right) * (Sh/Pr)^{-1/3}$$

Donde K_n es la permeabilidad, D_w es la difusividad, Sh es el número de Sherwood y Pr es el número de Prandtl.

Basándonos en estos estudios, en el presente capítulo se presenta la hipótesis de que los modelos de transferencia de masa basados en analogías con la transferencia de calor pueden ser utilizados para predecir la masa de agua secada por unidad de tiempo en un sistema convectivo en la interfaz de un sólido poroso húmedo, como la madera. Se propone que estos modelos pueden relacionarse con datos experimentales utilizando ecuaciones lineales simples. Por lo que el objetivo es obtener ecuaciones que relacionen la masa de agua secada por unidad de tiempo con las condiciones del aire caliente, incluyendo la tasa de flujo de aire, la temperatura y la humedad relativa, en las cuales se llevará a cabo el proceso de secado.

3.4. Materiales y Métodos

3.4.1. Material de estudio

Se utilizaron trozas del género *Pinus* obtenidas de un aserradero ubicado en el municipio de Durango, México. Las trozas se seleccionaron al azar y se transportaron al Laboratorio de Tecnología de la Madera del Instituto de Silvicultura e Industria de la Madera de la Universidad Juárez del Estado de Durango. Para evitar la pérdida de humedad, las trozas se almacenaron en una sala con condiciones controladas a 20°C y 80% de humedad relativa. Posteriormente, se cortaron y astillaron utilizando una máquina Industrial Duty SD4P25T61, obteniendo una distribución del tamaño de partículas de *P16S* ($3.15 \text{ mm} < P \leq 16 \text{ mm}$) siguiendo la norma UNE-EN 17225-4 (AENOR, 2014) (Figura 3.1). Las astillas de madera generadas se mantuvieron bajo las mismas condiciones de temperatura y humedad. Antes de las pruebas de secado, se determinó el contenido de humedad inicial de acuerdo con la norma UNE-EN 18134-3 (AENOR, 2016).



Figura 3. 1. Astillas de pino utilizadas en los tratamientos de secado: a) Astillas secas, b) Astillas húmedas en acondicionamiento, c) Astillas en secador.

3.4.2. Procedimiento de medida

Para evaluar el proceso de secado mediante aire caliente convectivo, se combinaron dos niveles de flujo de aire (V_1, V_2), tres niveles de temperatura (T_1, T_2, T_3) y dos niveles de altura de la columna de astillas de madera (A_1, A_2). En total, se crearon $2 \times 3 \times 2 = 12$ tratamientos experimentales, con 18 repeticiones de cada tratamiento, lo que resulta en un total de 216 observaciones. La Tabla 3.1 muestra los valores característicos para cada nivel.

Tabla 3. 1. Niveles de los factores evaluados en cada tratamiento.

	Flujo de aire (m s ⁻¹)		Temperatura (°C)		Altura de la columna de astillas (cm)
V ₁	6.93 – 8.46	T ₁	40.10 – 48.84	A ₁	3
		T ₂	48.84 – 57.58		
V ₂	8.46 – 9.99	T ₃	57.58 – 66.32	A ₂	6

Para cada prueba de secado, se colocaron tres cajas metálicas de 13.5 cm × 6.5 cm × 5.0 cm en el centro de la cámara de secado y se llenaron con astillas de madera (Figura 3.1). Las astillas en las cajas sirvieron como muestras de referencia para determinar la variación de humedad en los materiales durante el proceso. Antes de cada prueba de secado, las astillas de madera se tamizaron para eliminar las partículas finas que pudieran pasar a través de la malla y causar pérdida de masa sólida entre las mediciones de peso consecutivas. Luego, las astillas de madera se depositaron en la columna de secado de acuerdo con las condiciones de altura del tratamiento. Las cajas que contenían las astillas de madera se pesaron en una balanza cada 10 minutos durante un período de 2.5 a 8 horas, dependiendo del tratamiento. Finalmente, el contenido de humedad final se determinó según la norma UNE-EN 18134-3 (AENOR, 2016). Las condiciones del aire antes y después de pasar por la columna de secado se obtuvieron de los sensores de velocidad, temperatura y humedad.

3.4.3. Caracterización del proceso de secado

Se determinaron seis variables para caracterizar el proceso de secado:

1.- **Velocidad relativa media de secado ($\overline{\dot{m}_w}$)**. Se define como la masa promedio de agua eliminada de las astillas de madera por kilogramo de masa sólida seca y se calcula utilizando la Ecuación (3):

$$\overline{\dot{m}_w} = \frac{m_i - m_f}{t \cdot m_{seca}} \quad (3)$$

Donde:

$\overline{\dot{m}_w}$: promedio de la masa de agua removida por kilogramo de masa sólida seca (g de agua s⁻¹ kg⁻¹ de astillas de madera seca);

m_i : masa inicial de las astillas (g);

m_f : masa final de las astillas (g);

t : tiempo del proceso de secado (s);

m_{seca} : masa seca (kg de astilla de madera seca).

2.- **Velocidad absoluta media de secado ($\overline{\dot{m}_s}$)**. Se define como la masa promedio del agua eliminada de las astillas de madera por unidad de tiempo, y se calcula utilizando la Ecuación (4):

$$\overline{\dot{m}_s} = \frac{m_i - m_f}{t} \quad (4)$$

Donde:

$\overline{\dot{m}_s}$: promedio de la masa de agua removida por unidad de tiempo (g de agua s⁻¹);

m_i : masa inicial de las astillas (g);

m_f : masa final de las astillas (g);

t : tiempo del proceso de secado (s).

3.- **Velocidad relativa instantánea de secado (\dot{m}_w)**. Se define como la masa de agua que se elimina de las astillas de madera en un momento específico por kilogramo de masa sólida seca y se calcula utilizando la Ecuación (5):

$$\dot{m}_w = \frac{m_1 - m_2}{(t_2 - t_1) \cdot m_{seca}} \quad (5)$$

Donde:

\dot{m}_w : masa de agua removida por kilogramo de masa sólida seca en un instante (g de agua s⁻¹ kg⁻¹ de astillas de madera seca);

m_1 : masa de las astillas en el tiempo t_1 (g);

m_2 : masa final de las astillas en el tiempo t_2 (g);

t_1 : tiempo en el instante 1 (s);

t_2 : tiempo en el instante 2 (s);

m_{seca} : masa seca (kg de astilla de madera seca).

4.- **Velocidad absoluta instantánea de secado (\dot{m}_s)**. Se define como la masa de agua que se elimina de las astillas de madera en un momento específico y se calcula utilizando la Ecuación (6):

$$\dot{m}_s = \frac{m_1 - m_2}{t_2 - t_1} \quad (6)$$

Donde:

\dot{m}_s : masa de agua removida en un instante (g de agua s^{-1});

m_1 : masa de las astillas en el tiempo t_1 (g);

m_2 : masa final de las astillas en el tiempo t_2 (g);

t_1 : tiempo en el instante 1 (s);

t_2 : tiempo en el instante 2 (s).

5.- **Variación de humedad media ($\bar{\omega}$)**. Representa el porcentaje promedio de reducción de humedad por unidad de tiempo en el tratamiento y se calcula utilizando la Ecuación (7):

$$\bar{\omega} = \frac{\omega_i - \omega_f}{t} \quad (7)$$

Donde:

$\bar{\omega}$: porcentaje promedio de humedad removida por unidad de tiempo (% humedad s^{-1});

ω_i : contenido de humedad inicial en base húmeda de las astillas de madera (%);

ω_f : contenido de humedad final en base húmeda de las astillas de madera (%);

t : tiempo del proceso de secado (s).

6.- **Variación de humedad instantánea ($\dot{\omega}$)**. Representa el porcentaje de reducción de humedad por unidad de tiempo en un momento específico y se calcula utilizando la Ecuación (8):

$$\dot{\omega} = \frac{\omega_1 - \omega_2}{t_2 - t_1} \quad (8)$$

Donde:

$\dot{\omega}$: contenido de humedad eliminado en un instante ($\% \text{ s}^{-1}$);

ω_1 : contenido de humedad de las astillas en base húmeda en el tiempo t_1
(g);

ω_2 : contenido de humedad de las astillas en base húmeda en el tiempo t_2
(g);

t_1 : tiempo en el instante 1 (s);

t_2 : tiempo en el instante 2 (s).

Las velocidades de secado instantáneas relativa y absoluta, y la variación de humedad instantánea fueron evaluadas en función del contenido de humedad de las astillas de madera, obteniendo las pendientes de las curvas respectivas, es decir, $\frac{d\dot{\omega}}{d\omega}$, $\frac{dm_w}{d\omega}$, $\frac{dm_s}{d\omega}$, respectivamente.

3.4.4. Cálculo del coeficiente de transferencia de masa por convección

Basado en las condiciones iniciales del aire introducido en el secador, se calcularon las velocidades de secado promedio e instantáneas del proceso utilizando el modelo de transferencia de masa por convección basado en las Ecuaciones (1) y (2).

Para su aplicación, hubo incertidumbre acerca de la longitud característica más adecuada para obtener el número de Reynolds y calcular el coeficiente de transferencia de masa por convección h en la Ecuación (2). Por tanto, los cálculos se realizaron probando tres posibles longitudes características.

$L_{c-astillas}$: longitud promedio de la astilla.

L_{c-D1} : diámetro del tubo de suministro de aire antes del cono difusor (0.071 m).

L_{c-D2} : diámetro de la columna de secado (0.57 m).

Por otro lado, al calcular la velocidad del número de Reynolds es difícil medir con precisión la sección transversal a través de la cual el aire fluye a través de las astillas de madera. Para evaluar las posibilidades de simplificar el proceso de cálculo, se probaron dos velocidades:

v_1 : velocidad del aire medida con el anemómetro en el secador antes de su contacto con las astillas.

v_2 : velocidad del aire después de pasar a través la cama de astillas en el secador. Esta velocidad del aire se calculó utilizando la Ecuación (9):

$$v_2 = \frac{D_1^2 \cdot v_1}{D_2^2} \quad (9)$$

Donde:

v_2 : velocidad del aire después de pasar a través la cama de astillas en el secador (m/s);

v_1 : velocidad del aire antes de pasar a través la cama de astillas en el secador (m/s);

D_1 : diámetro del tubo de suministro de aire antes del cono difusor (m);

D_2 : diámetro del cilindro (m).

Las propiedades del aire (viscosidad y densidad) para determinar el número de Reynolds, el número de Schmidt y la difusividad se tomaron a la temperatura de entrada del aire en la columna de secado. Por tanto, al combinar las tres longitudes características y las dos velocidades de aire consideradas, se obtuvieron seis números de Reynolds y valores de h diferentes para evaluar las variables que proporcionaron el mejor ajuste a las observaciones experimentales.

El número de Sherwood se calculó utilizando la Ecuación (8) con los valores del número de Reynolds y el número de Schmidt. En este caso, Sc reemplaza al número de Prandtl, mientras que Sc_s es el número de Schmidt en la superficie de transferencia de masa.

$$(1000 < Re < 2 \cdot 10^5, Sc > 0.5)$$

$$Sh = 0.35 \cdot Re^{0.6} \cdot Sc^{0.36} \cdot (Sc/Sc_s)^{0.25} \quad (10)$$

Donde:

Sh : número adimensional de Sherwood;

Re : número adimensional de Reynolds;

Sc : número adimensional de Schmidt.

Para calcular el área de transferencia (A) utilizada en la Ecuación (1), se contaron todas las astillas dentro de las cajas metálicas y se midieron utilizando un calibrador digital. Posteriormente, se calculó el área de cada astilla considerando todos sus lados. El área se multiplicó por un coeficiente de 0.95, ya que las astillas no estaban completamente libres, sino que estaban adyacentes entre sí.

3.4.5. Análisis estadístico

Se realizaron pruebas de normalidad de Kolmogorov-Smirnov, así como la descripción estadística de la velocidad relativa media de secado ($\overline{\dot{m}_w}$), la velocidad absoluta media de secado ($\overline{\dot{m}_s}$), la variación media de secado ($\overline{\dot{\omega}}$), las pendientes de las curvas para la variación de las velocidades de secado, tanto relativa ($\frac{d\dot{m}_w}{d\omega}$) como absoluta ($\frac{d\dot{m}_s}{d\omega}$), junto con la variación de humedad instantánea con respecto al contenido de humedad ($\frac{d\dot{\omega}}{d\omega}$), para cada altura de columna de astillas, y para las diferentes velocidades y temperaturas del aire. Posteriormente, se realizaron análisis de varianza a todas las variables y sus posibles interacciones, además de la prueba de Diferencia Mínima Significativa (LSD) de Fisher para comparar las medias de todos los tratamientos. Todas las pruebas se llevaron a cabo con un

nivel de significancia de $p < 0.05$ y se implementaron en el programa estadístico Statgraphics 18®.

3.5. Resultados y Discusión

3.5.1. Descripción estadística de las variables medidas

En la Figura 3.2a, se muestra la variación del contenido de humedad de las astillas de madera a lo largo del tiempo. La Figura 3.2b representa la velocidad de secado instantánea en relación con el contenido de humedad. El contenido de humedad promedio inicial en los tratamientos fue del 42%, alcanzando un contenido de humedad promedio final del 15%. Numerosos estudios, como los de Coumans (2000) y Kucuk *et al.* (2014), indican que en los procesos de secado de materiales porosos existe un contenido de humedad crítico por encima del cual la velocidad de secado instantánea se mantiene constante, mientras que por debajo de este, la velocidad disminuye. En los experimentos de secado de las astillas de madera, se observa que la velocidad de secado relativa disminuye linealmente a medida que disminuye el contenido de humedad. En ningún momento del proceso la velocidad de secado se mantiene constante; en cambio, muestra una disminución lineal. Esto implica que el contenido de humedad crítico en las astillas de madera de *Pinus* spp. es superior al 42%. La ecuación lineal se ajusta con un r^2 de 0.99.

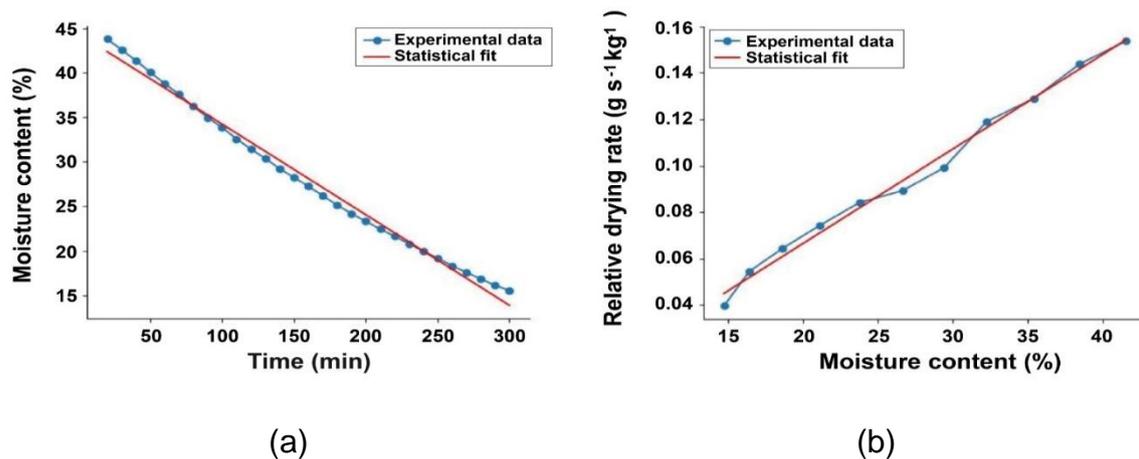


Figura 3. 2. (a) Pérdida de humedad de las astillas de madera de pino a lo largo del tiempo, (b) Velocidad de secado de las astillas de madera de pino.

Autores como Ananias *et al.* (2005), mencionan que el contenido de humedad crítico del pino radiata durante el secado al vacío es del 58%. Este contenido de humedad crítico es el contenido de humedad promedio cuando casi toda la humedad superficial del material se ha evaporado, y la velocidad de secado ya no es constante, indicando la influencia de los fenómenos de transferencia de masa dentro del material (Inoue *et al.*, 2009). Consistente con los resultados de Ananias *et al.* (2005), dado que el contenido de humedad inicial en los experimentos era inferior al 58%, se explica por qué la velocidad de secado de las astillas de madera de pino no exhibió un período constante, sino que disminuyó continuamente. Esta observación también ha sido reportada por autores como Ananias *et al.* (2009) para maderas de abeto y haya, así como por Arabi *et al.* (2017) y Hosseinabadi *et al.* (2012) en partículas de madera de álamo. Esto puede explicarse por la presencia de agua superficial libre en las astillas de madera, lo que indica la presencia de evaporación superficial constante. Así, se puede inferir que la transferencia de masa de humedad durante el secado ocurrió predominantemente por difusión (Sridhar & Madhu, 2015).

Keey *et al.* (2000) mencionan que en las maderas duras y en el duramen de las maderas blandas, el contenido de humedad crítico probablemente sea el contenido de humedad inicial. La afirmación de Keey *et al.* (2000) es debatible porque, al igual que en un proceso de calentamiento o enfriamiento donde debe asegurarse que la variación de temperatura dentro de una pieza específica sea uniforme, el número de Biot del proceso de transferencia de masa ($BIOT_{masa}$) necesita ser lo suficientemente pequeño para asegurar la ausencia de gradientes de humedad durante el proceso de secado. En la transferencia de calor, si el número de Biot es grande, se producen gradientes de temperatura durante los procesos de calentamiento y enfriamiento. En los procesos de secado, si la relación dada por la Ecuación (11) no es lo suficientemente pequeña, se producirán gradientes de humedad dentro de la pieza, y la tasa de secado dejará de ser constante más allá de cierto contenido de humedad.

$$BIOT_{masa} = \frac{h_m \cdot L_c}{D_w} \quad (11)$$

Donde h_m es el coeficiente de transferencia de masa por convección, L_c es la longitud característica, y D_w es la difusividad del agua en la pieza.

Por tanto, cabe señalar que a pesar de intentar crear piezas lo suficientemente pequeñas para que el número de Biot del proceso de transferencia de masa fuera pequeño, no se detectó una tasa de secado constante en ninguno de los casos. Se evaluó la hipótesis de que cuando no hay gradientes de humedad en una pieza en el proceso de secado, la velocidad con la que se elimina el agua es constante. Es decir, la masa de agua liberada por unidad de tiempo y masa no varía. Sin embargo, el secado a velocidad constante no se produjo en ninguno de los tratamientos. Este hecho se reporta en esta investigación y confirma las observaciones de otros investigadores como (Kuznetsov *et al.*, 2021). Esto sugiere que la difusividad del agua en la madera es excesivamente pequeña en comparación con el coeficiente de transferencia de masa en la superficie. Por esta razón, en el intento de relacionar la velocidad de secado experimental con las velocidades proporcionadas por los modelos de transferencia de masa, fue obligatorio trabajar con velocidades de secado experimentales promedio.

Inicialmente, fue necesario evaluar la normalidad de la velocidad relativa media de secado ($\overline{\dot{m}_w}$), la velocidad absoluta media de secado ($\overline{\dot{m}_s}$), y la variación media de secado ($\overline{\dot{\omega}}$). También se evaluaron las pendientes de las curvas para la variación de las velocidades de secado, tanto relativa ($\frac{d\dot{m}_w}{d\omega}$) como absoluta ($\frac{d\dot{m}_s}{d\omega}$), y la variación de humedad instantánea con el contenido de humedad ($\frac{d\dot{\omega}}{d\omega}$) (Tabla 3.2).

Tabla 3. 2. Descripción estadística de las variables cinéticas del proceso de secado en la configuración experimental para cada uno de los niveles de los factores estudiados.

Parámetro	Factor		Media	Desviación estándar	Mínimo	Máximo	Sesgo estandarizado	Curtosis estandarizada	
$\overline{\dot{m}_w}$ (g de agua s ⁻¹ kg ⁻¹ de astilla seca)	Altura	A ₁	0.063	0.015	0.034	0.104	0.61	-1.46	
		A ₂	0.040	0.010	0.023	0.066	1.72	-1.15	
	Velocidad del aire	V ₁	0.046	0.010	0.023	0.066	1.29	-0.38	
		V ₂	0.057	0.017	0.028	0.104	1.71	-1.35	
	Temperatura del aire	T ₁	0.041	0.010	0.023	0.064	0.96	-1.33	
		T ₂	0.058	0.012	0.034	0.084	1.62	-0.09	
		T ₃	0.055	0.019	0.028	0.104	-1.22	-0.73	
	$\overline{\dot{m}_s}$ (g de agua s ⁻¹)	Altura	A ₁	0.0031	0.0009	0.0019	0.0058	2.82	-0.18
			A ₂	0.0032	0.0008	0.0016	0.0055	1.65	-0.48
Velocidad del aire		V ₁	0.0028	0.0005	0.001	0.004	0.83	-1.75	
		V ₂	0.0035	0.0008	0.002	0.005	1.41	-1.17	
Temperatura del aire		T ₁	0.0024	0.0003	0.0016	0.0032	0.85	-0.73	
		T ₂	0.0035	0.0006	0.0022	0.0055	1.55	-0.28	
		T ₃	0.0036	0.0008	0.0025	0.0058	1.03	-1.01	
$\overline{\dot{\omega}}$ (% de agua s ⁻¹)		Altura	A ₁	0.0024	0.0008	0.00013	0.0047	2.53	-1.58
			A ₂	0.0017	0.0004	0.0008	0.0027	0.89	-1.12
	Velocidad del aire	V ₁	0.0019	0.0004	0.0008	0.0030	2.77	1.58	
		V ₂	0.0022	0.0007	0.0010	0.0041	3.58	0.04	
	Temperatura del aire	T ₁	0.0016	0.0004	0.0008	0.0028	1.94	-0.90	
		T ₂	0.0022	0.0003	0.0011	0.0030	2.87	0.89	
		T ₃	0.0024	0.0008	0.0018	0.0041	1.46	-1.76	
	$\frac{d\dot{m}_w}{d\omega}$ (g de agua s ⁻¹ kg ⁻¹ de astilla seca % ⁻¹)	Altura	A ₁	0.0028	0.0009	0.0013	0.0051	1.24	-1.75
			A ₂	0.0022	0.0007	0.0011	0.0040	1.73	-1.15
Velocidad del aire		V ₁	0.0021	0.0004	0.0011	0.0031	1.45	-0.57	
		V ₂	0.0029	0.0008	0.0013	0.0051	1.11	-0.88	
Temperatura del aire		T ₁	0.0019	0.0005	0.0011	0.0030	2.00	-0.88	
		T ₂	0.0027	0.0006	0.0013	0.0042	1.64	-0.79	
		T ₃	0.0030	0.0008	0.0016	0.0051	-0.43	-0.86	
$\frac{d\dot{m}_s}{d\omega}$ (g de agua s ⁻¹ % ⁻¹)		Altura	A ₁	0.00013	0.00004	0.00005	0.00029	3.84	1.94
			A ₂	0.00018	0.00006	0.00008	0.00034	2.94	-0.50
	Velocidad del aire	V ₁	0.00013	0.00003	0.00005	0.00023	1.77	-0.72	
		V ₂	0.00018	0.00006	0.00008	0.00034	2.28	-1.19	
	Temperatura del aire	T ₁	0.00011	0.00002	0.00007	0.00018	1.14	0.75	
		T ₂	0.00017	0.00005	0.00005	0.00031	1.93	-0.09	
		T ₃	0.00019	0.00006	0.00013	0.00034	1.46	-0.35	
	$\frac{d\dot{\omega}}{d\omega}$ (s ⁻¹)	Altura	A ₁	0.000049	0.00002	0.00002	0.00014	3.45	0.12
			A ₂	0.000041	0.00001	0.00002	0.00009	4.61	2.64
Velocidad del aire		V ₁	0.000040	0.00002	0.00002	0.00009	3.77	0.61	
		V ₂	0.000049	0.00002	0.00002	0.00011	3.58	0.10	
Temperatura del aire		T ₁	0.000052	0.00002	0.00002	0.00010	0.85	-1.83	
		T ₂	0.000038	0.00001	0.00002	0.00008	2.06	0.57	
		T ₃	0.000043	0.00001	0.00002	0.00009	2.01	0.87	

Para analizar si la temperatura, la velocidad del aire y la altura de la columna de astillas de son factores que influyen en la cinética del proceso de secado, se realizó una evaluación de los diferentes niveles y la interacción doble de estos factores. De relevancia son los coeficientes de sesgo y curtosis estandarizados,

que indican la proximidad de la distribución de la variable a la normalidad. Valores de estos coeficientes entre -2 y +2 indican que las distribuciones de todas las variables mostradas en la Tabla 3.2 se aproximan a una distribución normal. Por tanto, se puede aplicar el análisis de varianza para evaluar su significancia en el proceso, así como a los grupos de datos para un modelado de regresión fiable basado en modelos de transferencia de masa.

Los resultados del ANOVA mostrados en la Tabla 3.3 evalúan la influencia de cada factor en la cinética del proceso de secado. Además, también analizan las interacciones entre diferentes factores.

Tabla 3. 3. Valores promedio y resumen del ANOVA de las velocidades de secado y las pendientes de variación de la humedad de las astillas de pino por altura en el secador, y por rangos de velocidad del aire y temperatura.

Parámetro	Factores			Interacciones		
	Altura (A)	Velocidad del aire (V)	Temperatura del aire (T)	A × V	A × T	V × T
\overline{m}_w	A ₁ 0.063 ± 0.015 ^a A ₂ 0.040 ± 0.010 ^b	V ₁ 0.046 ± 0.010 ^b V ₂ 0.057 ± 0.017 ^a	T ₁ 0.041 ± 0.010 ^b T ₂ 0.058 ± 0.012 ^a T ₃ 0.055 ± 0.019 ^a	×	×	×
\overline{m}_s	A ₁ 0.0031 ± 0.0009 ^a A ₂ 0.0032 ± 0.0008 ^a	V ₁ 0.0028 ± 0.0005 ^b V ₂ 0.0035 ± 0.0008 ^a	T ₁ 0.0024 ± 0.0003 ^b T ₂ 0.0035 ± 0.0006 ^a T ₃ 0.0036 ± 0.0008 ^a	×	p=0.0001	×
$\overline{\dot{\omega}}$	A ₁ 0.0024 ± 0.0008 ^a A ₂ 0.0017 ± 0.0004 ^b	V ₁ 0.0019 ± 0.0004 ^b V ₂ 0.0022 ± 0.0007 ^a	T ₁ 0.0016 ± 0.0004 ^c T ₂ 0.0022 ± 0.0003 ^b T ₃ 0.0024 ± 0.0008 ^a	×	×	×
$\frac{dm_w}{d\omega}$	A ₁ 0.0028 ± 0.0009 ^a A ₂ 0.0022 ± 0.0007 ^b	V ₁ 0.0021 ± 0.0004 ^b V ₂ 0.0029 ± 0.0008 ^a	T ₁ 0.0019 ± 0.0005 ^c T ₂ 0.0027 ± 0.0006 ^b T ₃ 0.0030 ± 0.0008 ^a	×	×	×
$\frac{dm_s}{d\omega}$	A ₁ 0.00013±0.00004 ^b A ₂ 0.00018 ±0.00006 ^a	V ₁ 0.00013 ± 0.00003 ^b V ₂ 0.00018 ± 0.00006 ^a	T ₁ 0.00011 ± 0.00002 ^c T ₂ 0.00017 ± 0.00005 ^b T ₃ 0.00019 ± 0.00006 ^a	×	×	×
$\frac{d\dot{\omega}}{d\omega}$	A ₁ 0.000049 ± 0.00002 ^a A ₂ 0.000041 ± 0.00001 ^b	V ₁ 0.000040 ± 0.00002 ^b V ₂ 0.000049 ± 0.00002 ^a	T ₁ 0.000052 ± 0.00002 ^a T ₂ 0.000038 ± 0.00001 ^b T ₃ 0.000043 ± 0.00001 ^{ab}	×	p=0.02	p=0.0007

Valores con la misma letra son estadísticamente similares de acuerdo con la prueba de Diferencia Mínima Significativa (LSD) de Fisher ($p \geq 0.05$). El símbolo ± representa la desviación estándar. El símbolo × significa que no se presentó interacción.

3.5.2. Efecto de la altura de la columna de astillas

En la Tabla 3.3 se puede observar que la velocidad relativa de secado media ($\overline{\dot{m}_w}$), la variación de humedad media ($\overline{\dot{\omega}}$), son mayores para la altura de astillas de 3 cm. También ocurre esto con las pendientes de la velocidad relativa de secado ($\frac{d\dot{m}_w}{d\omega}$) y variación de humedad ($\frac{d\dot{\omega}}{d\omega}$). Estas son mayores para la altura de astillas de 3 cm. Por el contrario, la velocidad absoluta de secado media ($\overline{\dot{m}_s}$) es similar para ambas alturas (con 0.0032 g de agua s⁻¹ en 3 cm y 0.0033 de agua s⁻¹ en 6 cm)., y se observa un comportamiento diferente en la pendiente de la velocidad absoluta de secado ($\frac{d\dot{m}_s}{d\omega}$), que es mayor para una altura de 6 cm que cuando se usa una altura de columna de astilla de 3 cm (0.00018 y 0.00013 g de agua s⁻¹ %-¹, respectivamente). Estos resultados indican que la capacidad de absorción de partículas de agua en el aire es limitada. Aumentar la altura de la columna de astillas reduce la velocidad relativa de secado, pero no afecta la cantidad de agua eliminada por unidad de tiempo en el sistema. Ésta es una de las conclusiones que se desea resaltar.

Cuando la altura de la columna de astillas se incrementa, la cantidad de agua eliminada por unidad de tiempo permanece igual. Sin embargo, la velocidad con la que disminuye la humedad varía.

Resultados similares fueron reportados por Ozollapins *et al.* (2013) en el secado de juncos, pasto de canario y cáñamo con diferentes espesores de lecho de secado. Además, en dicho estudio encontraron que las velocidades de secado bajo flujo de aire y temperatura constantes mostraron una diferencia significativa cuando se variaba el espesor del lecho de secado y la cantidad de material que se estaba secando.

Esto puede explicarse por la resistencia de la presión de vapor en los espacios entre las astillas, ya que la presión dentro del área de secado aumenta con el espesor del lecho de astillas en el secador (Grubecki, 2015).

3.5.3. Efecto de la velocidad de circulación del aire

Podemos observar en la Tabla 3.3 que una mayor velocidad del aire conduce a velocidades de secado más altas, una mayor variación de humedad y pendientes más pronunciadas de las velocidades de secado y la variación de humedad. Este resultado es coherente porque el aire que pasa a través de los espacios entre las astillas se satura menos cuando fluye a una velocidad más alta.

Bengtsson (2008) menciona que bajo ciertas condiciones, la velocidad del aire influye principalmente en el período de velocidad de secado constante en astillas de abeto, mientras que la velocidad del aire y la temperatura tienen una mayor influencia en el período de disminución de la tasa de secado. El flujo de aire juega un papel importante en el secado. Sin embargo, según Tremblay *et al.* (2000), la velocidad de secado puede aumentar con un aumento en la velocidad del aire hasta un punto crítico a partir del cual un incremento en la velocidad del aire no aumentaría la velocidad de secado.

3.5.4. Efecto de la temperatura del aire

En el estudio del efecto de la temperatura del aire sobre las velocidades de secado medias relativa ($\overline{\dot{m}_w}$) y absoluta ($\overline{\dot{m}_s}$), se puede observar que ambas exhiben el mismo comportamiento (Tabla 3.3). Siendo $T_1 < T_2 < T_3$, se puede percibir, que no hay diferencias significativas entre las velocidades de secado en las temperaturas T_2 y T_3 , que son más altas que T_1 , con valores promedio de 0.041 g de agua $s^{-1} kg^{-1}$ de astilla seca en la velocidad relativa y 0.0024 g de agua s^{-1} en la velocidad absoluta. En otras palabras, un aumento en la temperatura del aire incrementará la velocidad de secado y disminuirá el tiempo de secado (Phanphanich & Mani, 2009).

De manera similar, la variación media de humedad ($\overline{\dot{\omega}}$) y las pendientes de las variaciones de la velocidad relativa de secado ($\frac{d\overline{\dot{m}_w}}{d\omega}$) y absoluta ($\frac{d\overline{\dot{m}_s}}{d\omega}$) siguen una tendencia similar. En el rango de temperatura del aire mayor (T_3) se observan las mayores variaciones, seguidas por T_2 y T_1 , respectivamente. En particular, la

pendiente de la variación de la humedad ($\frac{d\omega}{d\omega}$) es mayor cuando se utiliza el rango de temperatura T_1 y menor con el rango T_2 , con promedios de 0.000052 s^{-1} y 0.000038 s^{-1} , respectivamente. Esto significa que, a temperaturas de aire más bajas, la variación de la humedad en el tiempo es mayor en comparación con temperaturas más altas. Esto se puede atribuir al hecho de que, a temperaturas más altas, la humedad absorbida del aire puede ser mayor. En otras palabras, si la temperatura del aire es baja, la extracción de humedad de las astillas de madera hacia el entorno circundante también es baja (Cota-Espericueta & Ponce-Corral, 2008). Nótese que el valor de la pendiente es una relación de la variación de humedad respecto al tiempo respecto a la variación de humedad.

El calentamiento del aire de ventilación conduce a un aumento en el volumen de aire a presión constante. En consecuencia, calentar el aire de ventilación provocará un aumento en el flujo de aire volumétrico y el aire que pasa a través de los espacios entre las astillas se satura menos cuando fluye a una temperatura más alta dentro de un secador (Kuptz & Hartmann, 2021).

Ståhl *et al.* (2004) enfatizan que el secado a bajas temperaturas puede ser beneficioso cuando se utilizan residuos forestales para la combustión. De esta manera, se puede prevenir la volatilización de compuestos de alta energía.

3.5.5. Análisis de las interacciones

No se encontraron interacciones significativas entre la altura de la columna de astillas y la velocidad del aire para ningún parámetro (Tabla 3.3). Este efecto es contrario a los hallazgos reportados por Klavina *et al.* (2015), quienes encontraron que con la disminución de la capa de astillas de madera y el aumento del flujo de aire, la velocidad de secado mejoraba. En su modelo, la relación entre la velocidad de secado y el flujo de aire fue más intensa que la relación entre la velocidad de secado y el grosor de la capa. Aquí, el efecto de la interacción de la altura de la columna de astillas y la temperatura del aire solo tuvo un efecto significativo en la tasa de secado absoluta promedio ($\overline{m_s}$) y en la pendiente de la variación de la humedad ($\frac{d\omega}{d\omega}$) (Figura 3.3). Al utilizar los rangos de temperatura T_1 y T_2 , la

velocidad de secado es mayor para una altura de columna de astillas de madera de 6 cm. Sin embargo, al utilizar el rango de temperatura T_3 , la velocidad absoluta de secado es mayor para la altura de 3 cm (Figura 3.3a). Lo anterior podría atribuirse al mayor aumento en la humedad relativa del aire entre las astillas de madera en la columna de 6 cm de altura bajo temperaturas elevadas del aire. En otras palabras, en la columna de astillas de madera de 3 cm, el vapor de agua existente entre los poros es más fácil de eliminar en comparación con la columna de 6 cm, lo que resulta en una velocidad de secado más alta. Es necesario liberar la humedad relativa del aire entre los espacios en las astillas de madera (Ahmadinia *et al.*, 2022). Por otro lado, hay una influencia significativa de la altura de la columna de astillas de madera en la pendiente de la variación de la humedad en el rango de temperatura del aire T_1 , mientras que no es significativa para los rangos de temperatura T_2 y T_3 (Figura 3.3b). En otras palabras, cuando se utiliza el rango de temperatura T_1 y una menor altura en la columna de astillas de madera, la pendiente será mayor en comparación con los rangos de temperatura T_2 y T_3 , donde la pendiente de la variación es similar. Esto contradice a Lerman & Wennberg (2011), quienes indicaron que la velocidad de secado aumenta con la temperatura y la velocidad del aire, pero no está influenciada por la altura del lecho de astillas de madera.

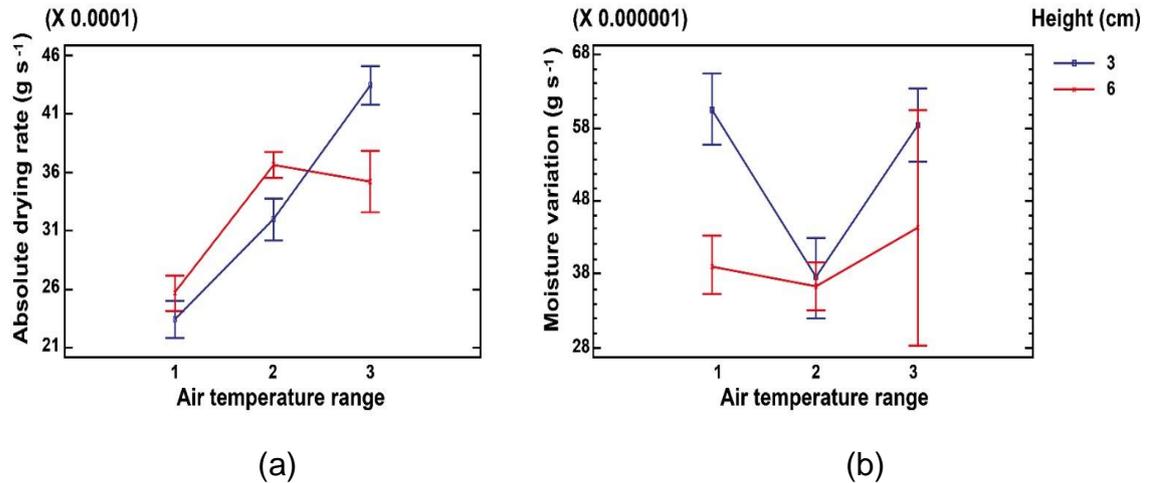


Figura 3. 3. Intervalos de la Mínima Diferencia Significativa (LSD) para la interacción entre los rangos de temperatura del aire y la altura en (a) la velocidad absoluta de secado y (b) la pendiente de la variación de la humedad. X se refiere al factor de escala.

Por otro lado, la interacción entre la velocidad del aire y la temperatura solo fue significativa para la pendiente de la variación de la humedad ($\frac{d\dot{\omega}}{d\omega}$) (Figura 3.4). Si la temperatura del aire es baja (rango T_1), la velocidad tiene una fuerte influencia, de manera que cuando la velocidad es alta, la variación de la humedad cambia significativamente más rápido con la disminución de la humedad en comparación con cuando la velocidad del aire es más baja. Sin embargo, a partir del rango T_2 , la velocidad del aire no modifica significativamente esta variable. Por tanto, se puede concluir que cuando se utilizan temperaturas altas, la velocidad del aire no afecta significativamente la variación de la humedad dentro de los rangos experimentados. Este hallazgo es consistente con el estudio realizado por Ndukwu (2009), quien observó que la temperatura del aire tiene un efecto más fuerte que la velocidad del aire durante el secado en la etapa constante en granos de cacao a bajas temperaturas. Este hecho es importante tenerlo en cuenta porque en los diseños de secadores en los que se quiera aumentar la velocidad de secado el empleo de la energía más eficiente será el utilizado para aumentar la temperatura antes que el aumento de la velocidad circulación del aire.

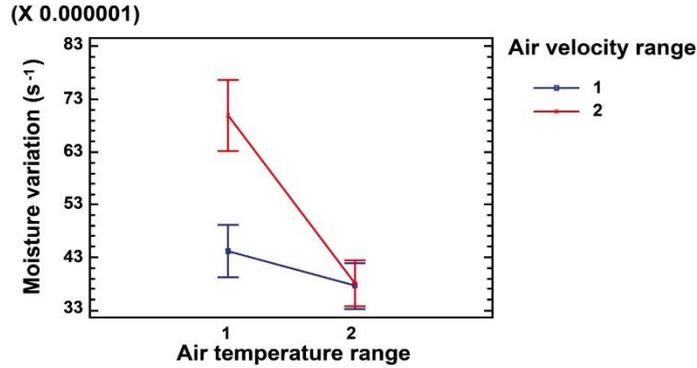


Figura 3. 4. Intervalos de la Mínima Diferencia Significativa (LSD) para la interacción entre los rangos de temperatura y velocidad del aire en la pendiente de la variación de la humedad contra el contenido de humedad. X se refiere al factor de escala.

3.5.6. Modelos de transferencia de masa en la predicción del tiempo de secado

Después de probar con las tres longitudes características posibles, las dos velocidades del aire para el cálculo del número de Reynolds y el coeficiente de transferencia de masa por convección h , aplicando los modelos de transferencia de masa basados en las Ecuaciones (1) y (2), se encontró que la longitud característica más adecuada fue $L_{c-astillas}$ que representa la longitud media de la astilla de madera, y v_1 , que denota la velocidad del aire medida con un anemómetro en el secador antes de entrar en contacto con las astillas de madera. Estas variables proporcionaron las velocidades de secado teóricas que mejor se ajustaron a los datos experimentales. Por tanto, las siguientes Ecuaciones (12) y (13) fueron consideradas las más apropiadas:

$$Re = \frac{v_1 \rho L_{c-astillas}}{\mu} \quad (12) \quad h = \frac{Sh \cdot D_w}{L_{c-astillas}} \quad (13)$$

La Tabla 3.4 presenta los modelos de transferencia de masa para predecir las velocidades de secado relativa y absoluta, así como la variación en el contenido de humedad promedio en diferentes alturas de la columna de astillas de madera en el secador. Estas ecuaciones son de suma importancia ya que la velocidad de

secado teórica se puede calcular para cualquier temperatura y condición de velocidad del aire dentro de cualquier columna de astillas de madera en un proceso de ventilación de aire caliente.

Tabla 3. 4. Ecuaciones que describen la velocidad relativa de secado media, la velocidad absoluta de secado media y la variación de humedad media para diferentes alturas de la columna de astillas de madera.

Parámetro	Altura	Modelo	R ² (%)	R ² ajustado (%)	MAE	RMSE
$\overline{\dot{m}_w}$	General	$0.0293 + 14.0941 \cdot \overline{\dot{m}_{wT}}$	57.11	56.87	0.0084	0.0101
	A ₁	$0.0418 + 10.5835 \cdot \overline{\dot{m}_{wT}}$	64.03	63.51	0.0068	0.0085
	A ₂	$0.0201 + 18.9509 \cdot \overline{\dot{m}_{wT}}$	59.87	59.43	0.0055	0.0067
$\overline{\dot{m}_s}$	General	$0.0017 + 0.0153 \cdot \overline{\dot{m}_{sT}}$	80.36	80.22	0.00031	0.00037
	A ₁	$0.0017 + 0.0148 \cdot \overline{\dot{m}_{sT}}$	86.20	86.00	0.00030	0.00035
	A ₂	$0.0016 + 0.0167 \cdot \overline{\dot{m}_{sT}}$	71.16	70.77	0.00031	0.00038
$\overline{\dot{\omega}}$	General	$0.0011 + 0.3963 \cdot \overline{\dot{\omega}_T}$	47.06	46.71	0.00025	0.00029
	A ₁	$0.0016 + 0.2038 \cdot \overline{\dot{\omega}_T}$	68.52	67.44	0.00011	0.00013
	A ₂	$0.0009 + 0.4899 \cdot \overline{\dot{\omega}_T}$	57.17	56.77	0.00022	0.00026

$\overline{\dot{m}_{wT}}$, $\overline{\dot{m}_{sT}}$ y $\overline{\dot{\omega}_T}$ son los valores obtenidos a partir de la aplicación de los modelos teóricos de transferencia de masa utilizando la Ecuación (1) $\dot{m}_s = h \cdot \rho_{aire} \cdot A \cdot (\omega_{sat} - \omega_{aire})$. MAE: Error Absoluto Medio, RMSE: Raíz del Error Cuadrático Medio.

Se puede observar que el coeficiente de determinación para los modelos de regresión que relacionan la velocidad de secado promedio teórica obtenida a partir de los modelos de transferencia de masa con la velocidad relativa de secado media ($\overline{\dot{m}_w}$) y absoluta ($\overline{\dot{m}_s}$), así como la variación de humedad media ($\overline{\dot{\omega}}$) obtenida experimentalmente, varía del 46.71% al 86.00%. Esto indica que los modelos explican del 46% al 86% de la variabilidad observada en los experimentos. Este resultado es similar al reportado por Ndukwu (2009), donde se observó un coeficiente de determinación del 84.8% para la relación entre la temperatura y la velocidad de secado, pero al incorporar la velocidad del aire, este coeficiente disminuyó al 80.9%.

Los valores obtenidos para el coeficiente de determinación pueden considerarse aceptables, considerando ciertas imprecisiones en la metodología aplicada. Por un lado, el hecho de retirar periódicamente cajas con astillas de madera del secador para registrar su variación de peso a lo largo del tiempo

introduce una fuente de error de medición. Por otro lado, determinar el área de transferencia se realiza de manera aproximada ya que puede variar de una pieza a otra, y es imposible medir con precisión todas las astillas de madera. Además, cuando las astillas de madera están en contacto entre sí, no toda la superficie está disponible para la eliminación de humedad. Sin embargo, se ha documentado que la velocidad de secado de las astillas de madera aumenta con la disminución del tamaño de las astillas (Pari *et al.*, 2015; Rezaei *et al.*, 2016; Ahmadiania *et al.*, 2022). Tenorio *et al.* (2014) mencionaron que las astillas de madera con una longitud de 10 cm muestran una pérdida de humedad más lenta, seguidas por astillas de 7 cm y 5 cm de longitud. Además, la velocidad del aire entre las astillas de madera es diferente de la considerada para calcular el número de Reynolds, ya que el área transversal de los espacios entre las astillas de madera es diferente a la del tubo de suministro de aire y mucho más pequeña que el área transversal del cilindro de secado. Varios estudios (Pecenka *et al.*, 2018; Anerud *et al.*, 2020; Ahmadiania *et al.*, 2022) mencionan que factores físicos como el tamaño de las astillas de madera conducen a diferentes volúmenes de espacios entre las astillas de madera, modificando así la difusión del vapor de agua desde el interior de la pila de astillas de madera hacia el exterior. Finalmente, existe la variabilidad intrínseca dentro de las muestras mismas. La estructura porosa de las astillas de madera puede diferir entre las astillas, lo que conduce a variaciones en el comportamiento de secado. Es decir, las magnitudes de la presión de succión, la fuerza de la gravedad y la resistencia a la viscosidad pueden cambiar dependiendo de la distribución del diámetro del poro entre las astillas de madera (Inoue *et al.*, 2009). Por tanto, tener un coeficiente de determinación entre los modelos que varía del 46% al 86% puede considerarse aceptable.

3.6. Conclusiones

Este estudio ha demostrado que la velocidad de secado de las astillas de madera de *Pinus* spp. no es constante, sino que disminuye con el tiempo, y que el contenido de humedad crítico está por encima del 42%. Además, aumentar la altura de la columna de astillas de madera disminuye la velocidad relativa de secado

alcanzando valores de $0.040 \text{ g de agua s}^{-1} \text{ kg}^{-1}$ de astilla seca, pero no afecta la cantidad de agua eliminada por unidad de tiempo en el sistema. Las desviaciones de transferencia de masa presentadas por los modelos tradicionales para calcular la tasa de secado promedio pueden corregirse aplicando los modelos de regresión obtenidos en este trabajo.

La aplicación de modelos teóricos de transferencia de masa requiere la selección de una velocidad de circulación de aire y la consideración de un área de transferencia de agua entre las astillas de madera y el aire para el cálculo del número de Reynolds, el número de Schmidt y, posteriormente, el número de Sherwood y h . Dada la dificultad de determinar con precisión estas variables, este estudio evaluó qué velocidades y áreas involucradas en el proceso permitían el cálculo de velocidades de secado teóricas que se correlacionaran mejor con los datos experimentales de la velocidad de secado promedio de *Pinus* spp. Se ha demostrado que el uso de la velocidad del aire antes de que encuentre las astillas de madera y la longitud característica tomada como la longitud media de la astilla de madera proporcionaron las velocidades de secado teóricas que mejor se ajustaron a los datos experimentales.

Por otro lado, se ha verificado que una mayor velocidad del aire conduce a velocidades de secado más altas, con valores de $0.057 \text{ g de agua s}^{-1} \text{ kg}^{-1}$ de astilla seca y $0.0035 \text{ g de agua s}^{-1}$, una mayor variación de humedad con valores de 0.0022% de agua s^{-1} y pendientes más pronunciadas en la variación de velocidades y contenido de humedad, con valores de $0.0029 \text{ g de agua s}^{-1} \text{ kg}^{-1}$ de astilla seca $\%^{-1}$, $0.00018 \text{ g de agua s}^{-1} \%$ y 0.000049 s^{-1} , respectivamente.

Una temperatura del aire más alta resulta en velocidades de secado más altas con valores de $0.055 \text{ g de agua s}^{-1} \text{ kg}^{-1}$ de astilla seca y $0.0036 \text{ g de agua s}^{-1}$, una mayor variación de humedad con valores de 0.0024% de agua s^{-1} , y pendientes más pronunciadas en la variación de las velocidades de secado con valores de $0.0030 \text{ g de agua s}^{-1} \text{ kg}^{-1}$ de astilla seca $\%^{-1}$ y $0.00019 \text{ g de agua s}^{-1} \%$

1. Sin embargo, no afecta significativamente la pendiente de la variación del contenido de humedad.

La velocidad de secado aumenta con la velocidad del aire y la temperatura, pero mientras la temperatura del aire tiene un impacto más significativo en la reducción del tiempo de secado, llega un punto en el que incrementar la velocidad del aire ya no acelera el proceso, especialmente cuando se utilizan temperaturas altas.

Desde una perspectiva práctica, los hallazgos pueden ser útiles para optimizar los procesos industriales de secado de madera. Saber que la velocidad de secado disminuye con el tiempo y que el contenido de humedad crítico es superior al 42% permite a los ingenieros ajustar los tiempos y las condiciones de secado para maximizar la eficiencia. Además, el hecho de que la altura de la columna de astillas afecte la velocidad de secado, pero no la cantidad total de agua eliminada sugiere que el diseño de los sistemas de secado podría mejorarse para equilibrar la eficiencia energética y la velocidad de producción.

Para investigaciones futuras, este estudio abre la puerta a nuevas exploraciones sobre cómo los parámetros de secado, como la velocidad y la temperatura del aire, pueden ajustarse aún más para distintos tipos de madera o diferentes configuraciones industriales. Los modelos de regresión propuestos también pueden ser la base para desarrollar modelos predictivos más precisos que tengan en cuenta variaciones específicas de otros materiales o condiciones ambientales. Esto podría llevar a un mayor entendimiento de los procesos de transferencia de masa en sistemas complejos, no solo en el secado de madera, sino también en otros campos donde la transferencia de humedad es crucial, como la conservación de alimentos, la producción de papel, y la fabricación de materiales compuestos.

3.7. Referencias bibliográficas

- AENOR. (2014). *UNE-EN 17225-4. Especificaciones y clases de combustibles. Parte 4: Clases de astillas de madera.*
- AENOR. (2016). *UNE-EN 18134-3. Determinación del contenido de humedad. Método de secado en estufa. Parte 3: humedad de la muestra para análisis general.*
- Ahmadinia, S., Palviainen, M., Kiuru, P., Routa, J., Sikanen, L., Urzainki, I., & Laurén, A. (2022). Forest chip drying in self-heating piles during storage as affected by temperature and relative humidity conditions. *Fuel*, 324, 124419. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124419>
- Ananias, R. A., Mougel, E., & Zoulalian, A. (2009). Introducing an overall mass-transfer coefficient for prediction of drying curves at low-temperature drying rates. *Wood Science and Technology*, 43(1–2), 43–56. <https://doi.org/10.1007/s00226-008-0216-3>
- Ananias, R. A., Vallejos, S., & Salinas, C. (2005). Estudio de la cinética del secado convencional y bajo vacío del pino radiata. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 7(1), 37–47.
- Anerud, E., Larsson, G., & Eliasson, L. (2020). Storage of wood chips: Effect of chip size on storage properties. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 41(2), 277–286. <https://doi.org/10.5552/crojfe.2020.663>
- Arabi, M., Faezipour, M. M., Layeghi, M., Khanali, M., & Zareahosseiniabadi, H. (2017). Evaluation of thin-layer models for describing drying kinetics of poplar wood particles in a fluidized bed dryer. *Particulate Science and Technology*, 35(6), 723–730. <https://doi.org/10.1080/02726351.2016.1196275>
- Bengtsson, P. (2008). Experimental analysis of low-temperature bed drying of wooden biomass particles. *Drying Technology*, 26(5), 602–610. <https://doi.org/10.1080/07373930801946726>
- Callejón Ferre, A. J., Carreño Sánchez, J., Suárez Medina, F. J., Pérez Alonso, J., & Velázquez Martí, B. (2014). Prediction models for higher heating value based on the structural analysis of the biomass of plant remains from the greenhouses of Almería (Spain). *Fuel*, 116. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.08.023>
- Çengel, Y. (2007). *Transferencia de calor y masa.* (Tercera ed). Mc Graw Hill / Interamericana Editores, S.A. de C.V.
- Chávez, C. A., Moraga, N. O., Salinas, C. H., Cabrales, R. C., & Ananías, R. A. (2021). Modeling unsteady heat and mass transfer with prediction of mechanical stresses in wood drying. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 123. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105230>

- Cota Espericueta, A. D., & Ponce Corral, C. (2008). Eliminación de bacterias patógenas en lodos residuales durante el secado solar. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 24(4), 161–170.
- Coumans, W. J. (2000). Models for drying kinetics based on drying curves of slabs. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 39(1), 53–68. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0255-2701\(99\)00084-7](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0255-2701(99)00084-7)
- Dedic, A. (2002). Modelling of coupled heat and mass transfer during convective drying of wood. *Drying Technology*, 20(6), 1299–1301. <https://doi.org/10.1081/drt-120004320>
- Grubecki, I. (2015). Airflow versus pressure drop for a mixture of bulk wood chips and bark at different moisture contents. *Biosystems Engineering*, 139, 100–110. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.08.008>
- Hosseinabadi, H. Z., Doosthoseini, K., & Layeghi, M. (2012). Drying kinetics of poplar (*Populus deltoides*) wood particles by a convective thin layer dryer. *Drvna Industrija*, 63(3), 169–176. <https://doi.org/10.5552/drind.2012.1201>
- Inoue, T., Iyota, H., Nishimura, N., & Yoshida, M. (2009). Effect of pore size distribution on heat and moisture transfer in porous material for high humidity hot air and superheated steam drying. *Journal of Japanese Society for Experimental Mechanics*, 9, 54–59. <https://doi.org/10.11395/jjsem.9.s54>
- Jalili, M., Anca Couce, A., & Zobel, N. (2013). On the uncertainty of a mathematical model for drying of a wood particle. *Energy and Fuels*, 27(11), 6705–6717. <https://doi.org/10.1021/ef401156s>
- Keey, R., Langrish, T. A. G., & Walker, K. C. F. (2000). *Kiln-drying of lumber* (1st ed.). Springer Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-642-59653-7>
- Khamtree, S., Ratanawilai, T., Nuntadusit, C., & Marzbani, H. (2020). Experimental study and numerical modeling of heat and mass transfer in rubberwood during kiln drying. *Heat and Mass Transfer*, 57(3), 453–464. <https://doi.org/10.1007/s00231-020-02970-2>
- Klavina, K., Cinis, A., & Zandeckis, A. (2015). Experimental study on the effects of air velocity, temperature and depth on low-temperature bed drying of forest biomass residue. *Energy Procedia*, 72, 42–48. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.06.007>
- Konopka, A., Barański, J., Orłowski, K. A., Mikielwicz, D., & Dzurenda, L. (2021). Mathematical model of the energy consumption calculation during the pine sawn wood (*Pinus sylvestris* L.) drying process. *Wood Science and Technology*, 55(3), 741–755. <https://doi.org/10.1007/s00226-021-01276-8>

- Koukouch, A., Bakhattar, I., Asbik, M., Idlimam, A., Zeghmati, B., & Aharoune, A. (2020). Analytical solution of coupled heat and mass transfer equations during convective drying of biomass: experimental validation. *Heat and Mass Transfer/Waerme- Und Stoffuebertragung*, 56(6), 1971–1983. <https://doi.org/10.1007/s00231-020-02817-w>
- Kucuk, H., Midilli, A., Kilic, A., & Dincer, I. (2014). A review on thin-layer drying-curve equations. *Drying Technology*, 32(7), 757–773. <https://doi.org/10.1080/07373937.2013.873047>
- Kuptz, D., & Hartmann, H. (2021). Prediction of air pressure resistance during the ventilation of wood chips as a function of multiple physical fuel parameters. *Biomass and Bioenergy*, 145, 105948. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105948>
- Kuznetsov, G. V., Syrodoy, S. V., Nigay, N. A., Maksimov, V. I., & Gutareva, N. Y. (2021). Features of the processes of heat and mass transfer when drying a large thickness layer of wood biomass. *Renewable Energy*, 169, 498–511. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.12.137>
- Lerman, P., & Wennberg, O. (2011). Experimental method for designing a biomass bed dryer. *Biomass and Bioenergy*, 35, S31–S39. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.04.033>
- Mohan, V. P. C., & Talukdar, P. (2013). Design of an experimental set up for convective drying: experimental studies at different drying temperature. *Heat and Mass Transfer*, 49, 31–40.
- Molczan, T., & Cyklis, P. (2023). Impact of the evaporation temperature on the air drying rate for a finned heat exchanger. *Energies*, 16(5), 2132.
- Ndukwu, M. C. (2009). Effect of drying temperature and drying air velocity on the drying rate and drying constant of cocoa bean. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 11.
- Ozollapins, M., Kakitis, A., & Nulle, I. (2013). Stalk biomass drying rate evaluation. *Engineering for Rural Development*, 482–487.
- Pari, L., Brambilla, M., Bisaglia, C., Del Giudice, A., Croce, S., Salerno, M., & Gallucci, F. (2015). Poplar wood chip storage: Effect of particle size and breathable covering on drying dynamics and biofuel quality. *Biomass and Bioenergy*, 81, 282–287. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.07.001>
- Pecenka, R., Lenz, H., & Idler, C. (2018). Influence of the chip format on the development of mass loss, moisture content and chemical composition of poplar chips during storage and drying in open-air piles. *Biomass and Bioenergy*, 116, 140–150. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.06.005>

- Phanphanich, M., & Mani, S. (2009). Drying characteristics of pine forest residues. *BioResources*, 5(1), 108–120.
- Rezaei, H., Jim Lim, C., Lau, A., Bi, X., & Sokhansanj, S. (2016). Development of empirical drying correlations for ground wood chip and ground wood pellet particles. *Drying Technology*, 35(12), 1423-1432. <https://doi.org/10.1080/07373937.2016.1198912>
- Sridhar, D., & Madhu, G. M. (2015). Drying kinetics and mathematical modeling of *Casuarina equisetifolia* wood chips at various temperatures. *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*, 59(4), 288–295. <https://doi.org/10.3311/PPch.7855>
- Ståhl, M., Granström, K., Berghel, J., & Renström, R. (2004). Industrial processes for biomass drying and their effects on the quality properties of wood pellets. *Biomass and Bioenergy*, 27(6), 621–628. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2003.08.019>
- Sychevskii, V. A. (2018). Heat and mass transfer in convective wood-drying Plants. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 91(3), 705–711. <https://doi.org/10.1007/s10891-018-1793-0>
- Tenorio, C., Moya Prof., R., & Cubero, R. (2014). Difusión del agua en astillas de madera de diez especies de rápido crecimiento en plantaciones en Costa Rica. *Interciencia*, 39(2), 129–135.
- Tremblay, C., Cloutier, A., & Fortin, Y. (2000). Experimental determination of the convective heat and mass transfer coefficients for wood drying. *Wood Science and Technology*, 34(3), 253–276. <https://doi.org/10.1007/s002260000045>
- Velázquez Martí, B. (2018). *Aprovechamiento de la biomasa para uso energético* (2ª ed.). Reverté.
- Velázquez Martí, B. (2024). *Aprovechamiento de la biomasa para uso energético* (3ª ed.). Reverté.

CAPÍTULO IV. INFLUENCIA DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA EN EL SECADO POR CONVECCIÓN DE ASTILLAS DE MADERA DE PINO

4.1. Resumen

La investigación sobre la cinética de secado para diferentes tamaños de partículas en un proceso de convección es muy relevante para avanzar en la precisión y sostenibilidad de los métodos de secado de la madera. La investigación actual tiene como objetivo investigar y evaluar la cinética de secado de diferentes tamaños de virutas de madera de pino en el proceso de secado por convección. Se construyó un secador experimental, lo que permitió un control preciso de la velocidad del aire y la temperatura. La experimentación implicó la utilización de dos categorías de tamaño de partícula y tres conjuntos diferentes de rangos de velocidad del aire y temperatura. Los hallazgos revelaron que los modelos explicaron entre el 58% y el 83% de la variabilidad observada en los tratamientos. El proceso de secado fue influenciado por el tamaño de las partículas, la temperatura del aire y la velocidad del aire. Las partículas más pequeñas se secaron más rápido, pero tuvieron una mayor variación de humedad, mientras que las partículas más grandes se secaron más lentamente, pero tuvieron una menor variación de humedad. Temperaturas de aire más altas y velocidades condujeron a tasas de secado más rápidas y menor variación de humedad. Se aplicaron modelos de transferencia de masa para analizar el proceso de secado, con modelos específicos desarrollados para diferentes tamaños de partículas para tener en cuenta su impacto en la eficiencia de transferencia de masa, proporcionando una comprensión más precisa del proceso de secado.

Palabras clave: astillas energéticas, cinética del secado, secado convectivo, tamaño de partícula, transferencia de masa

4.2. Abstract

The research on the drying kinetics for different particle sizes in a convection process is very relevant to advance the precision and sustainability of wood drying

methods. The current research aims to investigate and evaluate drying kinetics of different sizes of pine wood chips on the convection drying process. An experimental dryer was constructed, enabling precise control of air velocity and temperature. The experimentation involved the utilization of two particle size categories and three different sets of air velocity and temperature ranges. The findings revealed that the models explained between 58% and 83% of the observed variability in the treatments. The drying process was influenced by particle size, air temperature, and air velocity. Smaller particles dried faster, but had higher moisture variation, while larger particles dried slower, but had lower moisture variation. Higher air temperatures and velocities led to faster drying rates and lower moisture variation. Mass transfer models were applied to analyze the drying process, with specific models developed for different particle sizes to account for their impact on mass transfer efficiency, providing a more precise understanding of the drying process.

Keywords: energy chips, drying kinetics, convective drying, particle size, mass transfer

4.3. Introducción

Los biocombustibles sólidos, especialmente aquellos derivados de los residuos de madera desempeñan un papel crucial en México. Su utilización contribuye a la sostenibilidad aprovechando subproductos de actividades forestales e industriales, diversificando las fuentes de energía para mejorar la seguridad energética y mitigando la contaminación ambiental al convertir los residuos en una fuente de energía limpia (Maserá & Sacramento Rivero, 2022). Además, esta práctica tiene el potencial de generar empleo en áreas forestales, fortalecer la economía local y agregar valor a la industria maderera, promoviendo así el manejo forestal sostenible (Tripathi *et al.*, 2019).

En México, se estima que hay 15 millones de hectáreas de cobertura forestal capaces de soportar la producción maderera, compuestas principalmente por bosques templados, y el rendimiento anual esperado supera los 45 millones de

metros cúbicos, con aproximadamente 30 millones de metros cúbicos representando el volumen de madera en rollo (Torres-Rojo, 2021).

Entre la diversa gama de especies de bosques templados, las especies maderables predominantes en México son los pinos y su producción alcanzó los 5.0 millones de metros cúbicos de madera en rollo en la última década (SEMARNAT, 2016). Además, los métodos actuales de explotación forestal suelen dirigirse a especies de pino para su utilización en diversas aplicaciones industriales, y las actividades de tala también generan cantidades sustanciales de subproductos en forma de ramas de árboles, astillas de madera, corteza y serrín (Núñez-Retana *et al.*, 2020).

Los residuos de biomasa pueden emplearse en la producción de bioenergía. Sin embargo, al utilizar la biomasa como combustible, los parámetros críticos incluyen el poder calorífico y la inflamabilidad, ambos influenciados por el contenido de humedad de la biomasa misma (García-Torrent *et al.*, 2016). La presencia de agua en el material aumenta el consumo de energía durante el proceso de combustión para la evaporación, elevando en consecuencia la energía de activación para la ignición y liberando menos calor neto en el proceso (Velázquez-Martí, 2018).

El secado es una operación fundamental destinada a eliminar el agua para mejorar las propiedades caloríficas de los biocombustibles sólidos (Callejón-Ferre *et al.*, 2014). Sin embargo, secar biomasa es un desafío debido a su origen diverso y propiedades físicas, como por ejemplo su tamaño de partícula. No existe un método universal que se adapte a todos los tipos de residuos. Elegir la técnica y el equipo adecuados depende de las características del material, el producto deseado y los costos, lo que requiere estudios específicos para una selección óptima (Perazzini *et al.*, 2015).

El tamaño de partícula de la biomasa juega un papel crucial en el proceso de secado, que implica la eliminación de humedad para mejorar la estabilidad, reducir los costos de transporte y mejorar el contenido energético para aplicaciones como la combustión, la gasificación o la peletización (Lu *et al.*, 2010; Myllymaa *et*

al., 2015; Pari *et al.*, 2015). Este impacto es evidente en diversas industrias, incluidas la energía de biomasa, la pulpa y el papel, y el procesamiento de madera, donde el secado de astillas de madera es un proceso significativo (Lee & Bennington, 2005; Hietala *et al.*, 2011a). El tamaño de partícula de las astillas de madera influye directamente en la eficiencia del proceso de secado en estos sectores.

Comprender la velocidad de secado de astillas de madera de diferentes tamaños de partícula es fundamental en aplicaciones industriales por varias razones. Principalmente, esta información impacta directamente en la eficiencia de los procesos de secado, permitiendo una planificación más precisa y optimización del tiempo (Khouya, 2020). Además, la variación en la velocidad de secado según el tamaño de la partícula influye en la calidad del producto final al evitar posibles deformaciones y pérdida de propiedades mecánicas (Hietala *et al.*, 2011b). En términos de sostenibilidad, comprender cómo varía la tasa con diferentes tamaños de partícula contribuye a un manejo más eficiente de los recursos energéticos durante el secado de madera (Vusić *et al.*, 2021). Más aún, este conocimiento facilita la adaptación a la variabilidad inherente en las materias primas utilizadas en la industria maderera (Hietala *et al.*, 2011a). En resumen, comprender la tasa de secado en relación con el tamaño de partícula es esencial para mejorar la eficiencia, la calidad del producto y la sostenibilidad en el contexto de las operaciones industriales relacionadas con astillas de madera.

En el estudio de la transferencia de masa durante el secado de biomasa, el número de Biot adimensional emerge como un parámetro crítico que revela la interrelación entre la difusividad interna y la longitud característica del material. Este número proporciona información crucial para determinar si existen gradientes de humedad internos significativos, lo que influye significativamente en la tasa de secado (Akpınar & Dincer, 2005; Younsi *et al.*, 2006). Al comprender cómo la difusividad interna y la longitud característica afectan la distribución de humedad dentro del material, la eficiencia del proceso de secado puede evaluarse con mayor precisión, optimizando tanto la calidad del producto final como la gestión de los

recursos energéticos. Por tanto, una comprensión profunda del número de Biot se vuelve esencial para mejorar la eficiencia y sostenibilidad en operaciones industriales relacionadas con el secado de biomasa (Reineking *et al.*, 2024).

Es importante tener en cuenta que el tamaño óptimo de partícula para el secado de biomasa puede depender de varios factores, incluido el tipo de biomasa, el método de secado (por ejemplo, secado al aire, secado rotativo, secado en lecho fluidizado), el equipo utilizado y la aplicación prevista de la biomasa seca (Giudice *et al.*, 2019; Yi *et al.*, 2019). Por tanto, comprender y optimizar el proceso de secado se vuelve de suma relevancia.

La exploración científica de cómo las variaciones en el tamaño de las partículas impactan la cinética de secado por convección tiene una relevancia sustancial para avanzar en la precisión y sostenibilidad de las técnicas de secado de la madera. Rezaei *et al.* (2017) evaluaron el proceso de secado de partículas y pélets de astillas de pino en un secador de capa delgada, revelando que las partículas más pequeñas exhibieron una tasa de secado más rápida en comparación con las más grandes. Además, se observó que las constantes de secado para las partículas de pélets eran menores que las de las astillas de tamaño de partícula equivalente. Asimismo, Tenorio *et al.* (2014) investigaron el coeficiente de difusión del agua en astillas de madera de varias dimensiones en diez especies forestales. Sus hallazgos indicaron que las astillas de 10 cm de longitud mostraron la pérdida de humedad más lenta, seguidas por las astillas de 7 cm y 5 cm. Sin embargo, la incertidumbre pendiente de evaluar es la determinación de los valores de velocidad obtenidos para cada tamaño en función de la temperatura del aire, humedad relativa y velocidad de circulación. Kaplan & Celik (2018) en un secador donde las astillas se desplazaban a través de un tornillo sinfín en contracorriente a un flujo de aire subyaron la influencia sustancial del tamaño de las partículas y la velocidad de rotación del tornillo en el proceso de secado de astillas de madera, con implicaciones para el contenido final de humedad y el tiempo de residencia en el secador. De manera similar, Mohseni & Peters (2016) encontraron que, con partículas más pequeñas en el sistema, la tasa crítica de secado es mayor, al igual

que la pérdida de calor a la pared debido a la menor transferencia de calor por conducción y radiación entre las partículas y la pared. Esto resulta en un sistema más eficiente.

Con una comprensión integral del contexto delineado anteriormente, el presente estudio busca explorar y evaluar los valores cinéticos en cada tamaño de astillas de madera de pino en un proceso de secado por convección dentro de un secador de capa delgada, donde el aire circula verticalmente entre una columna de astillas.

4.4. Materiales y Métodos

4.4.1. Colección y acondicionamiento del material

Se utilizaron muestras de madera pertenecientes al género *Pinus* spp., obtenidas de una instalación de aserradero ubicada en el municipio de Durango, México. Estas muestras fueron seleccionadas al azar y transportadas al Laboratorio de Tecnología de la Madera, afiliado al Instituto de Silvicultura e Industria de la Madera de la Universidad Juárez del Estado de Durango. Para preservar su contenido original de humedad, se almacenaron en un ambiente controlado, manteniendo una temperatura constante de 20°C y una humedad relativa del 80%.

Posteriormente, las piezas de madera se sometieron a procesos de corte y astillado utilizando una máquina Industrial Duty SD4P25T61. Como las astillas de madera resultantes variaban en tamaño de partícula, de acuerdo con las normas descritas en UNE-EN 17225-4 (AENOR, 2014), se clasificaron como clase *P16S* ($3.15 \text{ mm} < P \leq 16 \text{ mm}$). Sin embargo, dado que el porcentaje restante de partículas, no clasificadas como *P16S* después del proceso de astillado, comprendía aproximadamente el 20% del total de las astillas de madera, se decidió categorizar las astillas en dos tamaños de partícula: P_1 ($3.15 \text{ mm} < P \leq 16 \text{ mm}$) y P_2 ($16.1 \text{ mm} < P \leq 45 \text{ mm}$). Una representación gráfica de estas clasificaciones se muestra en la Figura 4.1. Las astillas de madera resultantes se conservaron bajo las mismas condiciones ambientales controladas en cuanto a temperatura y humedad.



Figura 4. 1. Astillas de madera de pino, a la izquierda se muestran las partículas pequeñas (3.15-16.0 mm), y a la derecha las partículas grandes (16.1-45.0 mm).

Antes de realizar las pruebas de secado, se determinó el contenido inicial de humedad de las muestras de acuerdo con las disposiciones establecidas en la norma UNE-EN 18134-3 (AENOR, 2016).

4.4.2. Establecimiento y desarrollo del experimento

Basándose en las condiciones mínimas y máximas de temperatura y velocidad del aire en el secador, así como en el tamaño de partícula de las astillas de madera, se combinaron dos tamaños de partícula (P_1 y P_2), tres rangos de velocidad del aire (V_1 , V_2 y V_3) y tres rangos de temperatura del aire (T_1 , T_2 y T_3) (Tabla 4.1). Esto resultó en un total de 18 tratamientos, realizados por triplicado.

Tabla 4. 1. Rangos de los factores evaluados en cada tratamiento.

Tamaño de partícula (mm)		Velocidad de aire (m/s)		Temperatura del aire (°C)	
P_1	3.15 - 16.0	V_1	7.1 - 8.1	T_1	40.0 – 46.3
		V_2	8.2 - 9.1	T_2	46.4 – 52.6
P_2	16.1 - 45.0	V_3	9.2 - 10.1	T_3	52.7 – 59.1

En cada ensayo de desecación, se colocaron tres contenedores de metal de 13.5 cm × 6.5 cm × 5.0 cm, llenos de astillas de madera, en el centro de la masa columnar de material, que también estaba compuesta por astillas de madera. Estas

cajas de metal llenas de astillas de madera sirvieron como muestras de referencia para evaluar la variación en el contenido de humedad de los materiales durante el proceso. Antes de cada ensayo de desecación, las astillas de madera en las cajas se tamizaron para eliminar las partículas finas que pudieran pasar a través de la malla que contenía las astillas de madera. Esta precaución tenía como objetivo prevenir la mayor pérdida de masa sólida entre dos mediciones consecutivas de peso. Posteriormente, las astillas de madera se introdujeron en la columna de secado, variando el tamaño de partícula según las condiciones del tratamiento en curso.

A intervalos regulares de 10 minutos, se pesaron las cajas que contenían las astillas de madera utilizando una balanza. Este proceso de pesaje se extendió durante un período que varió de 2.5 a 8 horas, dependiendo de la especificidad de cada tratamiento. Finalmente, el contenido final de humedad se determinó siguiendo las directrices estipuladas en la norma UNE-EN 18134-3 (AENOR, 2016).

4.4.3. Análisis de la cinética experimental de secado por convección

Para evaluar la velocidad de secado de astillas de madera de pino, se establecieron tres variables, definidas como la velocidad relativa media de secado ($\overline{\dot{m}_w}$), la velocidad absoluta media de secado ($\overline{\dot{m}_s}$) y la variación de humedad media ($\overline{\dot{\omega}}$). Las ecuaciones que describen estas variables se enumeran a continuación:

$$\overline{\dot{m}_w} = \frac{m_i - m_f}{t \cdot m_{seca}} \quad (1)$$

Donde:

$\overline{\dot{m}_w}$: promedio de la masa de agua removida por kilogramo de masa sólida seca (g de agua s⁻¹ kg⁻¹ de astillas de madera seca);

m_i : masa inicial de las astillas (g);

m_f : masa final de las astillas (g);

t : tiempo del proceso de secado (s);

m_{seca} : masa seca (kg de astilla de madera seca).

$$\overline{\dot{m}_s} = \frac{m_i - m_f}{t} \quad (2)$$

Donde:

$\overline{\dot{m}_s}$: promedio de la masa de agua removida por unidad de tiempo (g de agua s⁻¹);

m_i : masa inicial de las astillas (g);

m_f : masa final de las astillas (g);

t : tiempo del proceso de secado (s).

$$\overline{\dot{\omega}} = \frac{\omega_i - \omega_f}{t} \quad (3)$$

Donde:

$\overline{\dot{\omega}}$: porcentaje promedio de humedad removida por unidad de tiempo (% humedad s⁻¹);

ω_i : contenido de humedad inicial en base húmeda de las astillas de madera (%);

ω_f : contenido de humedad final en base húmeda de las astillas de madera (%);

t : tiempo del proceso de secado (s).

4.4.4. Cálculo de la transferencia de masa teórica por convección

Siguiendo las ecuaciones presentadas por Çengel (2007) y Çengel & Cimbala (2006), se emplearon varias ecuaciones para determinar la transferencia de masa teórica por convectiva. La Ecuación (4) se utilizó para calcular la masa de agua removida por unidad de tiempo (\dot{m}_s), donde h (m s⁻¹) es una constante de proporcionalidad al área de transferencia A (m²), conocida como coeficiente de transferencia de masa convectiva, ρ_{aire} es la densidad del aire (kg m⁻³), y ω es la humedad absoluta y la saturación del aire (kg de agua kg⁻¹ de aire seco).

$$\dot{m}_s = h \cdot \rho_{aire} \cdot A \cdot (\omega_{sat} - \omega_{aire}) \quad (4)$$

Este coeficiente de transferencia de masa por convección h es de gran importancia, ya que depende del número de Sherwood (Sh) y se obtiene a partir

de la Ecuación (5), donde D_w es la difusividad de masa ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) y L_c la longitud característica (m).

$$h = \frac{Sh \cdot D_w}{L_c} \quad (5)$$

El número de Sherwood se puede calcular a partir del número de Reynolds (Re) y el número de Schmidt (Sc). La relación entre los números de Sherwood, Reynolds y Schmidt sigue una analogía con los procesos de transferencia de calor:

$$Sh = f(Re, Sc)$$

$$Re = \frac{v \rho_{aire} L_c}{\mu} \quad (6)$$

$$Sc = \frac{\mu}{\rho_{aire} D_w} \quad (7)$$

Donde:

v : velocidad del aire (m s^{-1})

ρ_{aire} : densidad del aire (kg m^{-3})

μ : viscosidad dinámica del fluido ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$).

$L_{c-astillas}$: longitud promedio de la astilla.

Además, no había certeza sobre cuál sería la velocidad más adecuada para calcular el número de Reynolds, ya que medir con precisión el área a través de la cual fluye el aire a través de las astillas de madera es un desafío. Para determinar si era posible simplificar el proceso de cálculo, se realizaron pruebas utilizando dos velocidades diferentes.

v_1 : velocidad del aire medida con el anemómetro en el secador antes de su contacto con las astillas.

v_2 : velocidad del aire después de pasar a través la cama de astillas en el secador, y se calculó utilizando la Ecuación (8):

$$v_2 = \frac{D_1^2 \cdot v_1}{D_2^2} \quad (8)$$

Donde:

v_2 : velocidad del aire después de pasar a través la cama de astillas en el secador (m s^{-1});

v_1 : velocidad del aire antes de pasar a través la cama de astillas en el secador (m s^{-1});

D_1 : diámetro del tubo de suministro de aire antes del cono difusor (m);

D_2 : diámetro del cilindro (m).

Para emplear modelos que se centren en calcular la cantidad de agua removida por unidad de tiempo (Ecuación 4), es esencial identificar la longitud característica óptima que se utilizará para calcular el número de Reynolds y determinar el coeficiente de transferencia de masa por convección, como se describe en las Ecuaciones (5) y (6). Para abordar este problema, se realizaron cálculos explorando tres posibles longitudes características:

Las propiedades del aire, como la viscosidad y la densidad, se utilizaron para calcular el número de Reynolds, el número de Schmidt y la difusividad. Estos cálculos se basaron en la temperatura del aire cuando ingresó a la columna de secado. En consecuencia, al combinar las tres longitudes características y las dos velocidades del aire consideradas, se generaron seis valores diferentes de números de Reynolds y h . Estos se utilizaron para evaluar las variables que permitirían encontrar los modelos que mejor se ajusten a los datos observados en los experimentos.

El número de Sherwood se calculó utilizando la Ecuación (9) a partir de la analogía con los procesos de transferencia de calor con el número de Reynolds y el número de Schmidt, donde Sc reemplaza al número de Prandtl, y Sc_s es el número de Schmidt en la superficie de transferencia de masa.

$$(1000 < Re < 2 \cdot 10^5, Sc > 0.5)$$

$$Sh = 0.35 \cdot Re^{0.6} \cdot Sc^{0.36} \cdot (Sc/Sc_s)^{0.25} \quad (9)$$

Donde:

Sh : número adimensional de Sherwood;

Re : número adimensional de Reynolds;

Sc : número adimensional de Schmidt.

Finalmente, para determinar el área de transferencia (A) utilizada en la Ecuación (4), todas las astillas de madera dentro de las cajas de metal primero se contaron y midieron utilizando un calibrador vernier digital. Posteriormente, se calculó el área de cada astilla de madera considerando sus dimensiones en todos los lados y se multiplicó por un coeficiente de 0.95, ya que las astillas de madera no estaban completamente separadas entre sí; es decir, estaban en contacto unas con otras. La humedad absoluta y de saturación se calcularon utilizando la humedad relativa en cada uno de los ensayos de secado.

4.4.5. Análisis estadístico

Se realizaron pruebas de normalidad de Kolmogorov-Smirnov para las variables velocidad relativa media de secado ($\overline{\dot{m}_w}$) y la velocidad absoluta media de secado ($\overline{\dot{m}_s}$). Dado que estas variables siguieron una distribución normal, se aplicaron análisis de varianza (ANOVA) y la prueba de Diferencia Mínima Significativa (LSD) de Fisher para comparar las medias de todos los tratamientos. Para la variable variación media de secado ($\overline{\dot{\omega}}$), que no siguió una distribución normal, se utilizó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis debido a que no siguió una distribución normal, por lo que posteriormente se aplicaron pruebas de Dunn para realizar comparaciones entre las distribuciones de los diferentes tratamientos. Todas las pruebas se llevaron a cabo con un nivel de significancia de $p < 0.05$ y se implementaron en el programa estadístico Statgraphics 18®.

4.5. Resultados y Discusión

4.5.1. Caracterización del proceso de secado

La Tabla 4.2 presenta los valores medios de la velocidad relativa, velocidad absoluta y variación de la humedad durante los tratamientos de secado. Los tratamientos iniciales correspondieron a aquellos con bajas temperaturas y velocidades del aire, y los tratamientos finales a altas temperaturas y velocidades del aire.

Tabla 4. 2. Valores experimentales promedio del proceso de secado.

Tratamiento	Tamaño de partícula (mm)	Rango de velocidad del aire (m s ⁻¹)	Rango de temperatura del aire (°C)	Velocidad relativa de secado (g s ⁻¹ kg ⁻¹)	Velocidad absoluta de secado (g s ⁻¹)	Variación de humedad (% s ⁻¹)
1	P_1	1	1	0.0380	0.0034	0.0013
2	P_2			0.0337	0.0030	0.0014
3	P_1	2	1	0.0495	0.0043	0.0015
4	P_2			0.0553	0.0041	0.0015
5	P_1	3	1	0.0503	0.0046	0.0015
6	P_2			0.0407	0.0036	0.0019
6	P_1	1	2	0.0530	0.0048	0.0014
8	P_2			0.0503	0.0039	0.0020
9	P_1	2	2	0.0611	0.0050	0.0017
10	P_2			0.0629	0.0049	0.0018
11	P_1	3	2	0.0725	0.0060	0.0016
12	P_2			0.0594	0.0051	0.0022
13	P_1	1	3	0.0524	0.0041	0.0016
14	P_2			0.0566	0.0047	0.0017
15	P_1	2	3	0.0677	0.0053	0.0014
16	P_2			0.0702	0.0052	0.0023
17	P_1	3	3	0.0806	0.0069	0.0020
18	P_2			0.0695	0.0057	0.0028

La velocidad relativa de secado varió desde 0.0337 g s⁻¹ kg⁻¹, observada en el tratamiento 1 con tamaños de partícula grandes (P_2), hasta 0.0806 g s⁻¹ kg⁻¹ en el tratamiento 9 con tamaños de partícula pequeños (P_1). Este resultado es consistente al de la velocidad absoluta de secado con 0.0030 g s⁻¹ y 0.0069 g s⁻¹ en los mismos tamaños de partícula. Por otro lado, la variación de humedad exhibió

un comportamiento ligeramente diferente y se situó dentro del rango de 0.0013 % s⁻¹ para partículas pequeñas (P_1) y 0.0028 % s⁻¹ para partículas grandes (P_2). Se proporciona una explicación más detallada de este comportamiento más adelante.

Para analizar si el tamaño de partícula de las astillas de madera, la temperatura y la velocidad del aire fueron factores que influyeron en la cinética del proceso de secado, se realizó una evaluación estadística de los diferentes niveles. Según la prueba de Kolmogorov-Smirnov, el nivel de confianza para la normalidad del parámetro de la tasa de secado relativa fue $p=0.85$, y para la tasa de secado absoluta fue $p=0.32$, lo que respalda la suposición de normalidad en estos parámetros. Esto justificó la aplicación del análisis de varianza para evaluar la significancia del proceso (Tabla 4.3). En contraste, la variación de la humedad no siguió una distribución normal, ya que el valor p asociado fue 0.04. Por tanto, se eligió la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis para abordar la falta de normalidad en este parámetro específico.

Tabla 4. 3. Efecto de los factores estudiados sobre las velocidades de secado medias y la variación de humedad media de las astillas de *Pinus* spp.

Factores	Parámetros		
	\bar{m}_w (g s ⁻¹ kg ⁻¹)	\bar{m}_s (g s ⁻¹)	$\bar{\omega}$ (% s ⁻¹)
Tamaño de partícula	P_1 0.0583 ± 0.0008 ^a	P_1 0.0049 ± 0.00006 ^a	P_1 0.0015 ± 0.00003 ^b
	P_2 0.0554 ± 0.0007 ^b	P_2 0.0044 ± 0.00006 ^b	P_2 0.0019 ± 0.00003 ^a
Velocidad del aire	V_1 0.0473 ± 0.0009 ^b	V_1 0.0039 ± 0.00009 ^c	V_1 0.0014 ± 0.0009 ^c
	V_2 0.0611 ± 0.0010 ^a	V_2 0.0048 ± 0.00008 ^b	V_2 0.0017 ± 0.0008 ^b
	V_3 0.0621 ± 0.0008 ^a	V_3 0.0053 ± 0.00008 ^a	V_3 0.0020 ± 0.0008 ^a
Temperatura del aire	T_1 0.0445 ± 0.0013 ^c	T_1 0.0038 ± 0.0009 ^c	T_1 0.0015 ± 0.00004 ^c
	T_2 0.0598 ± 0.0008 ^b	T_2 0.0049 ± 0.0008 ^b	T_2 0.0017 ± 0.00004 ^b
	T_3 0.0661 ± 0.0012 ^a	T_3 0.0053 ± 0.0008 ^a	T_3 0.0019 ± 0.00003 ^a

Valores con las mismas letras son estadísticamente similares de acuerdo con la prueba de Diferencia Mínima Significativa (LSD) de Fisher ($p \geq 0.05$). El símbolo ± indica la desviación estándar.

En los siguientes apartados se detallan los resultados presentados en la Tabla 4.3, donde se analiza el efecto del tamaño de partícula de las astillas de pino,

y la velocidad y temperatura del aire sobre las velocidades de secado y la variación medias de humedad de las astillas.

4.5.2. Tamaño de partícula

Como se muestra en la Tabla 4.3, el comportamiento del tamaño de partícula se alinea con las velocidades de secado relativas y absolutas, siendo más rápidas para las partículas más pequeñas. Contrariamente, la variación de humedad fue mayor para las partículas más grandes. Esto se debe a que la velocidad de secado es generalmente más rápida en partículas pequeñas debido a la mayor superficie en relación con su volumen (Bates & Ghoniem, 2014; Rezaei *et al.*, 2017). Este hallazgo es consistente con los resultados reportados por Mohseni & Peters (2016), quienes investigaron el efecto de la distribución del tamaño de las partículas de madera en la tasa de secado y la pérdida de calor. También es similar a los hallazgos reportados por Tenorio *et al.* (2014), quienes observaron que las astillas más pequeñas exhibían una mayor difusión de agua en comparación con las más grandes. Las partículas pequeñas proporcionan más sitios de evaporación en comparación con las partículas más grandes, lo que permite que el agua se libere más fácilmente (Jirjis, 2005). En otras palabras, el agua en la superficie de las partículas pequeñas se evapora más rápidamente, acelerando así el proceso de secado.

Tomando en consideración lo anterior, se podría deducir que el proceso de secado de las astillas de madera está gobernado principalmente por la convección de masa. Es decir, el número de Biot puede ser menor de 0.1 (Górnicki *et al.*, 2019), lo cual conlleva algunas implicaciones prácticas.

Si el proceso de secado está dominado por la convección de masa, el diseño experimental del prototipo debe centrarse en optimizar las condiciones de flujo de aire, considerando factores como la velocidad, temperatura y humedad relativa del aire de secado, ya que son cruciales para maximizar la eficiencia (Devahastin & Mujumdar, 2006). El sistema debe asegurar un flujo de aire uniforme y controlado a través del lecho de astillas, evitando zonas de estancamiento o flujos irregulares que puedan llevar a un secado no uniforme. La velocidad del aire debe ser lo

suficientemente alta para remover la humedad desde la superficie de las astillas, pero sin causar un secado excesivamente rápido que selle la humedad interna (Hovmand, 2020). Además, la disposición de las astillas en el lecho de secado debe minimizar la resistencia al flujo de aire y permitir un contacto máximo entre el aire y la superficie de las astillas, lo que podría requerir un diseño de lecho fluidizado o con cámaras de aire adecuadamente distribuidas (Daud, 2008).

Además, para asegurar un secado uniforme y eficiente, es vital implementar un control estricto del proceso. Monitorear y ajustar el flujo de aire es clave para evitar el secado superficial y asegurar la eliminación eficiente de la humedad interna. Sensores en tiempo real permiten ajustes dinámicos que optimizan la velocidad de secado (Su *et al.*, 2015). Al inicio, un flujo intenso puede remover rápidamente la humedad superficial, mientras que un flujo más suave es mejor en etapas posteriores para permitir la migración de la humedad interna (Aghbashlo *et al.*, 2015). Además, un secado en ciclos, con periodos de reposo, puede equilibrar la humedad y promover un secado más uniforme (Wei *et al.*, 2018).

También, se puede inferir que, dado que las partículas más pequeñas tienen una mayor superficie y, por tanto, más sitios de evaporación, la humedad puede concentrarse más en la superficie de las partículas durante el proceso de secado. Esto sugiere que no existen gradientes de humedad dentro de las partículas debido a la insignificante resistencia interna a la difusividad de la humedad dentro de las astillas de madera, lo cual es casi inalcanzable en el proceso de secado de la madera (Zhan *et al.*, 2007). Si las partículas son lo suficientemente pequeñas para que la convección domine en todo el cuerpo de la partícula, entonces el proceso podría considerarse casi totalmente impulsado por la transferencia de masa, y por tanto, adecuado para un enfoque de cero dimensional. Sin embargo, si las partículas son lo suficientemente grandes como para que la transferencia de calor sea significativa en el centro de la partícula, entonces se requeriría un enfoque más dimensional para modelar adecuadamente el proceso de secado (Johansen *et al.*, 2016).

El uso de tamaños de partícula pequeños puede presentar algunos efectos significativos. Por ejemplo, en ciertos sistemas de secado, las partículas más pequeñas pueden ocasionar problemas como la formación de puentes de partículas o bloqueos en el equipo de secado, causando problemas operativos y reduciendo la eficiencia general (Dai *et al.*, 2012). Además, la producción de polvo, especialmente de partículas finas de astillas de madera durante el manejo y transporte, plantea preocupaciones tanto en términos de impacto ambiental como de consideraciones de seguridad (Bridgwater *et al.*, 2002).

Con respecto a la variación de humedad, esta fue mayor en las partículas grandes porque pueden retener agua dentro de ellas por un período más largo (Weigl *et al.*, 2013). Las partículas grandes pueden tener un núcleo húmedo incluso cuando la superficie está seca, lo que lleva a una mayor variación en el contenido de humedad a lo largo del material (de Diego *et al.*, 2003). Dukarska *et al.* (2022) encontraron resultados similares, con contenidos de humedad más altos en partículas más grandes de madera. Sin embargo, el mayor contenido de humedad en las partículas de madera resultó en una mayor densidad aparente en la producción de tableros de partículas de tres capas. Por el contrario, Lenz *et al.* (2015) reportaron un mayor contenido de humedad en astillas de madera más pequeñas en comparación con las más grandes; sin embargo, su investigación se realizó al aire libre utilizando astillas de madera de álamo en pilas cubiertas.

De acuerdo con lo anterior, se sugiere que el tamaño de partícula óptimo sería aquel que permite un secado rápido y uniforme. Las partículas más pequeñas se secan más rápido debido a su mayor superficie, pero podrían concentrar la humedad en la superficie, lo que sugiere una posible falta de uniformidad en el secado interno. Sin embargo, dado que no se observan gradientes de humedad significativos dentro de las partículas, las partículas pequeñas parecen ser más favorables. Esto indica que, para maximizar la eficiencia del secado sin comprometer la calidad, un tamaño de partícula relativamente pequeño sería óptimo. No obstante, es importante considerar que demasiado pequeño podría generar polvo o pérdida de material, por lo que una medida intermedia que

maximice la superficie sin reducir demasiado la integridad estructural podría ser ideal.

4.5.3. Velocidad y temperatura del aire

La influencia de la temperatura y la velocidad del aire tanto en las tasas de secado relativas y absolutas, como en la variación de la humedad, mostraron un patrón coherente. Se registraron mayores velocidades y variaciones a temperaturas y velocidades del aire elevadas, mientras que se observaron valores más bajos a temperaturas y velocidades del aire reducidas. Este comportamiento es consistente con los hallazgos reportados en varios estudios (Myllymaa *et al.*, 2015; Arabi *et al.*, 2017; Fernando *et al.*, 2018).

La temperatura y la velocidad del aire juegan roles cruciales en el proceso de secado. Un aumento en la temperatura del aire acelera la velocidad de secado al aumentar la energía cinética de las moléculas de agua, facilitando su evaporación (Vega-Gálvez *et al.*, 2012). Esta mayor energía también promueve una transferencia de calor más eficiente entre el material y el aire circundante. Por otro lado, una mayor velocidad del aire mejora la velocidad de secado al aumentar la tasa de transporte de humedad desde la superficie del material hacia el ambiente (Abbasfard *et al.*, 2013).

Del mismo modo, en lo que respecta a las variaciones de humedad, el empleo de altas temperaturas aumenta la presión de vapor requerida para la condensación del vapor de agua en el entorno de secado, lo que resulta en una menor condensación durante el secado (Murugesan *et al.*, 2002). Además, la velocidad del aire también desempeña un papel significativo, una velocidad óptima del aire puede minimizar las variaciones en el contenido de humedad, proporcionando un entorno más controlado durante el proceso de secado (Möttönen, 2006).

Por último, los resultados indican que a mayor velocidad del aire, mayor es la velocidad de secado, lo cual es beneficioso para acortar el tiempo total del proceso. Sin embargo, en los procesos de secado, hay un punto en el que incrementar aún más la velocidad del aire deja de tener un impacto considerable

en la velocidad de secado y solo aumenta los costos de energía. Por tanto, para determinar la velocidad óptima, se debe encontrar un equilibrio entre la eficiencia del secado y el consumo energético. No obstante, según la tendencia observada, la velocidad óptima del aire sería aquella que maximiza la velocidad de secado tanto relativa como absoluta, sin llegar a una eficiencia decreciente.

4.5.4. Aplicación de los modelos de transferencia de masa en el proceso de secado convectivo

Como se indicó anteriormente, el número de Reynolds (Re) y el coeficiente de transferencia de masa por convección (h) se determinaron experimentando con dos velocidades del aire y tres longitudes características (Anexos). En el contexto del cálculo de las velocidades de secado basadas en la aplicación de modelos de transferencia de masa por convección, se determinó que la longitud característica más apropiada es el diámetro del cilindro L_{c-D2} . Además, se seleccionó la velocidad del aire v_1 , medida con el anemómetro antes de entrar en contacto con las astillas de madera en el secador. Las Ecuaciones correspondientes a estos cálculos son las siguientes:

$$Re = \frac{v_1 \rho L_{c-D2}}{\mu} \quad (10) \quad h = \frac{Sh \cdot D_w}{L_{c-D2}} \quad (11)$$

Mientras que para para el cálculo de la variación de humedad utilizando modelos teóricos de transferencia de masa por convección, se identificó que la longitud característica óptima es la longitud media de las astillas de madera $L_{c-astillas}$, y de manera similar, la velocidad del aire v_1 . Las Ecuaciones utilizadas fueron las siguientes:

$$Re = \frac{v_1 \rho L_{c-astillas}}{\mu} \quad (12) \quad h = \frac{Sh \cdot D_w}{L_{c-astillas}} \quad (13)$$

En el secado de materiales porosos, la velocidad del aire influye directamente en el número de Reynolds y, consecuentemente, en el flujo alrededor y a través de los poros del material (Lee *et al.*, 2020). A bajas velocidades, el flujo

de aire tiende a ser laminar, lo que significa que las capas de fluido se deslizan suavemente unas sobre otras. En contraste, a velocidades más altas, el flujo puede volverse turbulento, caracterizado por la formación de vórtices y una mezcla más intensa de las capas de fluido (Steiner, 2008). En términos de secado de madera, un flujo laminar puede ser menos efectivo para eliminar eficientemente la humedad, ya que puede resultar en una capa estancada de aire húmedo cerca de la superficie de la madera (Wood *et al.*, 2015). Por otro lado, el flujo turbulento tiende a mejorar la transferencia de masa al romper esta capa y permitir una mayor exposición de la madera al aire fresco y seco (Wood *et al.*, 2020).

Además del hecho de que la longitud característica también afecta al número de Reynolds, influyendo en la eficiencia de la transferencia de masa al modificar la interacción entre el flujo de aire y los poros de la madera (Lee *et al.*, 2020), una longitud característica más grande tiende a disminuir el coeficiente de transferencia de masa por convección al proporcionar una mayor área superficial para la transferencia de masa, distribuyendo el efecto sobre una región más extensa. Por el contrario, una longitud característica más pequeña puede aumentar el coeficiente al concentrar la transferencia de masa en una superficie más pequeña (Losey *et al.*, 2001).

La elección de desarrollar una tabla de modelos exclusivamente para diferentes tamaños de partículas (Tabla 4.4) se basa en la complejidad inherente de los factores en juego en el proceso de secado. La heterogeneidad en los tamaños de partículas se reconoce como un componente crucial que impacta directamente en la eficiencia de la transferencia de masa (Fernando *et al.*, 2018). Dada la variabilidad significativa en la geometría y el área superficial de las partículas de madera de diferentes tamaños, se eligió un enfoque específico para abordar esta variabilidad. La simplicidad y especificidad de los modelos diseñados para los tamaños de partículas proporcionan una herramienta analítica precisa adaptada a las condiciones del sistema de secado en estudio, facilitando así una comprensión más profunda y efectiva del proceso.

Tabla 4. 4. Modelos derivados de la aplicación de los modelos teóricos de transferencia de masa para tamaños de partículas de astillas de madera de *Pinus* spp.

Parámetro	Tamaño de partícula	Ecuación	R ² (%)	R ² ajustada (%)	MAE	RMSE
$\overline{\dot{m}_w}$	General	$4.4260 + 157.06 \cdot \overline{\dot{m}_{wT}}$	60.98	58.55	1.0809	1.6182
	P ₁	$5.5875 + 192.07 \cdot \overline{\dot{m}_{wT}}$	78.98	75.98	0.9564	1.4068
	P ₂	$1.9607 + 96.66 \cdot \overline{\dot{m}_{wT}}$	58.60	52.69	0.7276	1.0656
$\overline{\dot{m}_s}$	General	$6.1997 + 2277.95 \cdot \overline{\dot{m}_{sT}}$	76.14	74.65	0.9336	1.2653
	P ₁	$6.7447 + 2506.11 \cdot \overline{\dot{m}_{sT}}$	83.07	80.65	1.0060	1.2627
	P ₂	$3.5164 + 1547.21 \cdot \overline{\dot{m}_{sT}}$	75.53	72.02	0.5538	0.8192
$\overline{\dot{\omega}}$	General	$0.0672 + 72.57 \cdot \overline{\dot{\omega}_T}$	82.83	81.75	0.0092	0.0132
	P ₁	$0.0110 + 100.73 \cdot \overline{\dot{\omega}_T}$	81.74	79.13	0.0083	0.0105
	P ₂	$0.0595 + 68.19 \cdot \overline{\dot{\omega}_T}$	80.33	77.52	0.0091	0.0156

$\overline{\dot{m}_{wT}}$, $\overline{\dot{m}_{sT}}$ y $\overline{\dot{\omega}_T}$ son los valores obtenidos a partir de la aplicación de modelos teóricos de transferencia de masa basados en la Ecuación (1) $\dot{m}_s = h \cdot \rho_{air} \cdot A \cdot (\omega_{sat} - \omega_{air})$. MAE: Error Absoluto Medio, RMSE: Raíz del Error Cuadrático Medio.

Los modelos derivados de la aplicación de modelos teóricos de transferencia de masa explicaron entre el 58% y el 83% de la variabilidad observada en los tratamientos. El coeficiente de determinación en los modelos osciló entre el 58.60 y el 78.98 en la velocidad relativa media de secado ($\overline{\dot{m}_w}$), entre el 75.53 y el 83.07 en la velocidad absoluta media de secado ($\overline{\dot{m}_s}$), y entre el 80.33 y el 82.83 en la variación de humedad media ($\overline{\dot{\omega}}$).

Las limitaciones en los coeficientes de determinación se atribuyen a diversas imprecisiones metodológicas que afectaron la recolección de datos. En primer lugar, la extracción periódica de muestras del secador para registrar su peso y contenido de humedad introdujo posibles errores debido a la variabilidad temporal del proceso de secado (Danvind, 2005). En algunos casos, la automatización y el uso de tecnologías avanzadas, como sensores de humedad en línea, pueden ser preferibles (Gattani *et al.*, 2005; Mende & Shurupov, 2015; Tamme, 2023). Estas tecnologías permiten un monitoreo continuo sin interrupciones significativas en el proceso.

También, la medición precisa de todas las astillas de madera tomadas como muestras podría haber sido afectada por desafíos prácticos y técnicos, lo que

generó variabilidad en los resultados. Trabajos como el de Chanpet *et al.* (2020) mencionan que el grosor de la madera tiene la influencia más significativa en el coeficiente de transferencia de masa total y en el tiempo de secado. Del mismo modo, Haberle *et al.* (2018) afirman que el tiempo de conversión térmica aumenta significativamente con el tamaño de partícula. Por tanto, la falta de una medición precisa puede llevar a una subestimación o sobreestimación del área de transferencia efectiva. El uso de modelos que consideren la forma de las partículas, como los presentados por Lu *et al.* (2010), pueden reducir la variabilidad en el cálculo del área de transferencia de masa.

Además, la fluctuación en la tasa de flujo de aire entre las astillas de madera dentro de la columna de secado del secador también contribuyó a la inconsistencia de las condiciones experimentales, ya que no fue la misma que la considerada para el número de Reynolds, lo que resultó en datos menos precisos. Las partículas pequeñas limitan el flujo de aire, lo que potencialmente reduce la descomposición de la materia orgánica, la generación de calor y la pérdida de materia seca de la pila (Jylhä *et al.*, 2022). Esto podría abordarse aplicando un análisis de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD, por sus siglas en inglés) para estudiar la dinámica del flujo de aire en la columna de astillas de madera. Dado que el aire, el medio principal de CFD, también es un fluido, y la longitud característica se puede calcular porque el espacio interior por el que fluye el aire se puede definir como un sistema de tuberías (Lee *et al.*, 2020). Este enfoque ofrece una comprensión detallada de la velocidad y distribución del aire.

Finalmente, la diferencia en la porosidad de las propias astillas de madera introduce una fuente adicional de variabilidad, ya que las características estructurales de las astillas de madera pueden afectar la adsorción de humedad y la liberación de manera no uniforme (de Paiva-Souza & Nebra, 2000; Jalili *et al.*, 2013). Las astillas de madera con diferentes niveles de porosidad pueden experimentar velocidades de secado diferentes. Aquellas con mayor porosidad pueden secarse más rápido, mientras que las menos porosas pueden retener la humedad durante un período más largo (Grubecki, 2015).

Estas imprecisiones metodológicas, en conjunto, limitaron los modelos para representar con precisión las complejidades del proceso de secado, manifestadas en coeficientes de determinación menos precisos. Es crucial reconocer y abordar estas posibles fuentes de error para mejorar la calidad de los datos y, consecuentemente, la capacidad predictiva de los modelos en estudios futuros.

4.6. Conclusiones

El estudio sobre las características de secado de las astillas de madera de *Pinus* spp. utilizando modelos teóricos de transferencia de masa reveló información significativa sobre el proceso de secado. Los modelos explicaron de manera efectiva una parte sustancial de la variabilidad observada en los tratamientos, con coeficientes de determinación que indican buenas capacidades predictivas para la velocidad relativa media de secado, la velocidad absoluta media de secado y la variación de humedad media.

Se evidenció la influencia del tamaño de partícula, temperatura y velocidad del aire en el proceso de secado. Las partículas más pequeñas secan más rápidamente, pero muestran menor variación de humedad que las más grandes. Además, temperaturas y velocidades del aire más altas aceleran el secado y reducen la variación de humedad.

Para optimizar el proceso de secado de astillas de madera, es esencial considerar tanto el tamaño de las partículas como la velocidad del aire. Las partículas más pequeñas, debido a su mayor superficie, permiten un secado más rápido, lo que las hace ideales para aplicaciones industriales que buscan eficiencia. Sin embargo, es importante seleccionar un tamaño que maximice la superficie sin comprometer la integridad estructural de las astillas. Por otro lado, una mayor velocidad del aire también favorece un secado más rápido, pero debe encontrarse un equilibrio que maximice la eficiencia sin incurrir en un consumo energético excesivo. La combinación óptima de un tamaño de partícula pequeño y una velocidad del aire adecuada no solo mejorará la eficiencia del secado, sino que también garantizará una mejor uniformidad en la humedad final del producto.

Al aplicar modelos de transferencia de masa adaptados a diferentes tamaños de partículas, el estudio proporcionó una comprensión más detallada y precisa del proceso de secado, lo que aporta conocimientos valiosos que pueden informar y optimizar los procesos de secado de astillas de madera en diversas aplicaciones industriales. Además, estos hallazgos ofrecen una base sólida para futuras investigaciones orientadas a refinar los parámetros de secado y mejorar la calidad y eficiencia del proceso bajo diversas condiciones operativas.

4.7. Referencias bibliográficas

AENOR. (2014). *UNE-EN 17225-4. Especificaciones y clases de combustibles. Parte 4: Clases de astillas de madera.*

AENOR. (2016). *UNE-EN 18134-3. Determinación del contenido de humedad. Método de secado en estufa. Parte 3: humedad de la muestra para análisis general.*

Abbasfard, H., Rafsanjani, H. H., Ghader, S., & Ghanbari, M. (2013). Mathematical modeling and simulation of an industrial rotary dryer: A case study of ammonium nitrate plant. *Powder Technology*, 239, 499–505. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2013.02.037>

Aghbashlo, M., Sotudeh-Gharebagh, R., Zarghami, R., Mujumdar, A. S., & Mostoufi, N. (2015). Measurement techniques to monitor and control fluidization quality in fluidized bed dryers: A review. *Drying Technology*, 32(9), 1005–1051. <https://doi.org/10.1080/07373937.2014.899250>

Akpinar, E. K., & Dincer, I. (2005). Application of moisture transfer models to solids drying. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 219(3), 235–244. <https://doi.org/10.1243/095765005X7538>

Arabi, M., Faezipour, M. M., Layeghi, M., Khanali, M., & Zareahosseiniabadi, H. (2017). Evaluation of thin-layer models for describing drying kinetics of poplar wood particles in a fluidized bed dryer. *Particulate Science and Technology*, 35(6), 723–730. <https://doi.org/10.1080/02726351.2016.1196275>

Bates, R. B., & Ghoniem, A. F. (2014). Modeling kinetics-transport interactions during biomass torrefaction: The effects of temperature, particle size, and moisture content. *Fuel*, 137, 216–229. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.07.047>

Bridgwater, A. V., Toft, A. J., & Brammer, J. G. (2002). A techno-economic comparison of power production by biomass fast pyrolysis with gasification and combustion. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 6(3).

[https://doi.org/10.1016/S1364-0321\(01\)00010-7](https://doi.org/10.1016/S1364-0321(01)00010-7)

- Callejón Ferre, A. J., Carreño Sánchez, J., Suárez Medina, F. J., Pérez Alonso, J., & Velázquez Martí, B. (2014). Prediction models for higher heating value based on the structural analysis of the biomass of plant remains from the greenhouses of Almería (Spain). *Fuel*, 116. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.08.023>
- Çengel, Y. (2007). *Transferencia de calor y masa*. (Tercera ed). Mc Graw Hill / Interamericana Editores S.A. de C.V.
- Çengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2006). *Fluid mechanics: Fundamentals and applications* (First ed.). McGraw-Hill Book Company, Inc., New York.
- Chanpet, M., Rakmak, N., Matan, N., & Siripatana, C. (2020). Effect of air velocity, temperature, and relative humidity on drying kinetics of rubberwood. *Heliyon*, 6(10), e05151. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05151>
- Dai, J., Cui, H., & Grace, J. R. (2012). Biomass feeding for thermochemical reactors. *Progress in Energy and Combustion Science*, 38(5), 716–736. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2012.04.002>
- Danvind, J. (2005). *Analysis of drying wood based on nondestructive measurements and numerical tools*. Luleå tekniska universitet.
- Daud, W. R. W. (2008). Fluidized bed dryers - Recent advances. *Advanced Powder Technology*, 19(5), 403–418. [https://doi.org/10.1016/s0921-8831\(08\)60909-7](https://doi.org/10.1016/s0921-8831(08)60909-7)
- de Diego, L. F., García Labiano, F., Abad, A., Gayán, P., & Adanez, J. (2003). Effect of moisture content on devolatilization times of pine wood particles in a fluidized bed. *Energy and Fuels*, 17(2), 285–290. <https://doi.org/10.1021/ef0201477>
- de Paiva Souza, M. E., & Nebra, S. A. (2000). Heat and mass transfer model in wood chip drying. *Wood and Fiber Science*, 32(2), 153–163.
- Devahastin, S., & Mujumdar, A. S. (2006). Indirect dryers. In A. S. Mujumdar (Ed.), *Handbook of industrial drying* (Fourth, pp. 127–137). CRC Press - Taylor & Francis Group.
- Dukarska, D., Rogoziński, T., Antov, P., Kristak, L., & Kmiecik, J. (2022). Characterisation of wood particles used in the particleboard production as a function of their moisture content. *Materials*, 15(1). <https://doi.org/10.3390/ma15010048>
- Fernando, N., Narayana, M., & Wickramaarachchi, W. A. M. K. P. (2018). The effects of air velocity, temperature and particle size on low-temperature bed drying of wood chips. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 8(1), 211–223. <https://doi.org/10.1007/s13399-017-0257-7>

- García Torrent, J., Ramírez Gómez, Á., Fernandez Anez, N., Medic Pejic, L., & Tascón, A. (2016). Influence of the composition of solid biomass in the flammability and susceptibility to spontaneous combustion. *Fuel*, *184*, 503–511. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.07.045>
- Gattani, N., del Castillo, E., Ray, C. D., & Blankenhorn, P. R. (2005). Time series analysis and control of a dry kiln. *Wood and Fiber Science*, *37*(3), 472–483.
- Giudice, A. Del, Acampora, A., Santangelo, E., Pari, L., Bergonzoli, S., Guerriero, E., Petracchini, F., Torre, M., Paolini, V., & Gallucci, F. (2019). Wood chip drying through the using of a mobile rotary dryer. *Energies*, *12*, 1590.
- Górnicki, K., Winiczenko, R., & Kaleta, A. (2019). Estimation of the biot number using genetic algorithms: Application for the drying process. *Energies*, *12*(14). <https://doi.org/10.3390/en12142822>
- Grubecki, I. (2015). Airflow versus pressure drop for a mixture of bulk wood chips and bark at different moisture contents. *Biosystems Engineering*, *139*, 100–110. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.08.008>
- Haberle, I., Haugen, N. E. L., & Skreiberg, Ø. (2018). Combustion of thermally thick wood particles: a study on the influence of wood particle size on the combustion behavior. *Energy and Fuels*, *32*(6), 6847–6862. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.8b00777>
- Hietala, M., Niinimäki, J., & Oksman, K. (2011a). Processing of wood chip-plastic composites: Effect on wood particle size, microstructure and mechanical properties. *Plastics, Rubber and Composites*, *40*(2), 49–56. <https://doi.org/10.1179/174328911X12988622800855>
- Hietala, M., Samuelsson, E., Niinimäki, J., & Oksman, K. (2011b). The effect of pre-softened wood chips on wood fibre aspect ratio and mechanical properties of wood-polymer composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, *42*(12), 2110–2116. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2011.09.021>
- Hovmand, S. (2020). Fluidized bed drying. In *Handbook of Industrial Drying* (1st ed., pp. 195–248). CRC Press - Taylor & Francis Group.
- Jalili, M., Anca-Couce, A., & Zobel, N. (2013). On the uncertainty of a mathematical model for drying of a wood particle. *Energy and Fuels*, *27*(11), 6705–6717. <https://doi.org/10.1021/ef401156s>
- Jirjis, R. (2005). Effects of particle size and pile height on storage and fuel quality of comminuted *Salix viminalis*. *Biomass and Bioenergy*, *28*(2), 193–201. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2004.08.014>
- Johansen, J. M., Jensen, P. A., Glarborg, P., Mancini, M., Weber, R., & Mitchell, R.

- E. (2016). Extension of apparent devolatilization kinetics from thermally thin to thermally thick particles in zero dimensions for woody biomass. *Energy*, 95, 279–290. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.11.025>
- Jylhä, P., Ahmadiania, S., Hyvönen, J., Ari, A., Prinz, R., Sikanen, L., & Routa, J. (2022). Self-heating, drying, and dry matter losses of stockpiled stemwood chips: The effect of ventilation. *Energies*, 15, 7094. <https://doi.org/10.3390/en15197094>
- Kaplan, O., & Celik, C. (2018). An experimental research on woodchip drying using a screw conveyor dryer. *Fuel*, 215, 468–473. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.11.098>
- Khouya, A. (2020). Performance assessment of a heat pump and a concentrated photovoltaic thermal system during the wood drying process. *Applied Thermal Engineering*, 180, 115923. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115923>
- Lee, M., Park, G., Park, C., & Kim, C. (2020). improvement of grid independence test for computational fluid dynamics model of building based on grid resolution. *Advances in Civil Engineering*, 11. <https://doi.org/10.1155/2020/8827936>
- Lee, Q. F., & Bennington, C. P. J. (2005). The effect of particle size distribution on pressure drop through packed beds of cooked wood chips. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 83(4), 755–763. <https://doi.org/10.1002/cjce.5450830416>
- Lenz, H., Idler, C., Hartung, E., & Pecenka, R. (2015). Open-air storage of fine and coarse wood chips of poplar from short rotation coppice in covered piles. *Biomass and Bioenergy*, 83, 269–277. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.09.018>
- Losey, M. W., Schmidt, M. A., & Jensen, K. F. (2001). Microfabricated multiphase packed-bed reactors: characterization of mass transfer and reactions. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 40, 2555–2562. <https://doi.org/10.1021/ie000523f>
- Lu, H., Ip, E., Scott, J., Foster, P., Vickers, M., & Baxter, L. L. (2010). Effects of particle shape and size on devolatilization of biomass particle. *Fuel*, 89(5), 1156–1168. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2008.10.023>
- Masera, O., & Sacramento Rivero, J. C. (2022). Promoting a sustainable energy transition in Mexico: the role of solid biofuels. *Bioenergy Research*, 15(4), 1691–1693. <https://doi.org/10.1007/s12155-022-10540-z>
- Mende, F. F., & Shurupov, I. . A. (2015). Simple camera for high-quality wood drying. *Engineering and Technology*, 2(3), 95–117.

- Mohseni, M., & Peters, B. (2016). Effects of particle size distribution on drying characteristics in a drum by XDEM: A case study. *Chemical Engineering Science*, *152*, 689–698. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2016.07.004>
- Möttönen, V. (2006). Variation in drying behavior and final moisture content of wood during conventional low temperature drying and vacuum drying of *Betula pendula* timber. *Drying Technology*, *24*(11), 1405–1413. <https://doi.org/10.1080/07373930600952750>
- Murugesan, K., Thomas, H. R., & Cleall, P. J. (2002). An investigation of the influence of two-stage drying conditions on convective drying of porous materials. *International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow*, *12*(1), 29–46. <https://doi.org/10.1108/09615530210413154>
- Myllymaa, T., Holmberg, H., Hillamo, H., Laajalehto, T., & Ahtila, P. (2015). Wood chip drying in fixed beds: drying kinetics and economics of drying at a municipal combined heat and power plant site. *Drying Technology*, *33*(2), 205–215. <https://doi.org/10.1080/07373937.2014.945179>
- Núñez Retana, V. D., Rosales Serna, R., Prieto Ruíz, J. Á., Wehenkel, C., & Carrillo Parra, A. (2020). Improving the physical, mechanical and energetic properties of *Quercus* spp. wood pellets by adding pine sawdust. *Peer J*, *8*, 1–20. <https://doi.org/10.7717/peerj.9766>
- Pari, L., Brambilla, M., Bisaglia, C., Del Giudice, A., Croce, S., Salerno, M., & Gallucci, F. (2015). Poplar wood chip storage: Effect of particle size and breathable covering on drying dynamics and biofuel quality. *Biomass and Bioenergy*, *81*, 282–287. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.07.001>
- Perazzini, H., Freire, F. B., Freire, F. B., & Freire, J. T. (2015). Thermal treatment of solid wastes using drying technologies: A review. *Drying Technology*, *34*(1), 39–52. <https://doi.org/10.1080/07373937.2014.995803>
- Reineking, L., Fischer, J., Mjalled, A., Illana, E., Wirtz, S., Scherer, V., & Mönnigmann, M. (2024). Convective drying of wood chips: Accelerating coupled DEM-CFD simulations with parametrized reduced single particle models. *Particuology*, *84*, 158–167. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2023.03.012>
- Rezaei, H., Jim Lim, C., Lau, A., Bi, X., & Sokhansanj, S. (2017). Development of empirical drying correlations for ground wood chip and ground wood pellets particles. *Drying Technology*, *35*(12), 1423–1432.
- SEMARNAT. (2016). *Anuario Estadístico de la Producción Forestal*.
- Steiner, Y. (2008). *Optimizing the air velocity in an industrial wood drying process*. Norwegian University of Life Sciences.

- Su, Y., Zhang, M., & Mujumdar, A. S. (2015). Recent developments in smart drying technology. *Drying Technology*, 33(3), 260–276. <https://doi.org/10.1080/07373937.2014.985382>
- Tamme, H. (2023). *Development of control and optimization methods for wood drying* [Estonian University of Life Sciences]. <http://www.nber.org/papers/w16019>
- Tenorio, C., Moya Prof., R., & Cubero, R. (2014). Difusión del agua en astillas de madera de diez especies de rápido crecimiento en plantaciones en costa rica. *Interciencia*, 39(2), 129–135.
- Torres-Rojo, J. M. (2021). Illegal logging and the productivity trap of timber production in Mexico. *Forests*, 12(7), 838. <https://doi.org/10.3390/f12070838>
- Tripathi, N., Hills, C. D., Singh, R. S., & Atkinson, C. J. (2019). Biomass waste utilisation in low-carbon products: harnessing a major potential resource. *Npj Climate and Atmospheric Science*, 2(1), 1-10. <https://doi.org/10.1038/s41612-019-0093-5>
- Vega Gálvez, A., Ah-Hen, K., Chacana, M., Vergara, J., Martínez Monzó, J., García Segovia, P., Lemus Mondaca, R., & Di Scala, K. (2012). Effect of temperature and air velocity on drying kinetics, antioxidant capacity, total phenolic content, colour, texture and microstructure of apple (var. Granny Smith) slices. *Food Chemistry*, 132(1), 51–59. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.10.029>
- Velázquez Martí, B. (2018). *Aprovechamiento de la biomasa para uso energético* (2nd ed.). Reverté.
- Vusić, D., Vujanić, F., Pešić, K., Šafran, B., Jurišić, V., & Zečić, Ž. (2021). Variability of normative properties of wood chips and implications to quality control. *Energies*, 14(13), 3789. <https://doi.org/10.3390/en14133789>
- Wei, Y., Gong, R. H., Ning, L., & Ding, X. (2018). Enhancing the energy efficiency of domestic dryer by drying process optimization. *Drying Technology*, 36(7), 790–803. <https://doi.org/10.1080/07373937.2017.1356329>
- Weigl, M., Schmidberger, C., & Müller, U. (2013). Water retention of wood particles - Characterization of polarity and particle size. *European Journal of Wood and Wood Products*, 71(2), 147–151. <https://doi.org/10.1007/s00107-012-0634-7>
- Wood, B. D., Apte, S. V., Liburdy, J. A., Ziazi, R. M., He, X., Finn, J. R., & Patil, V. A. (2015). A comparison of measured and modeled velocity fields for a laminar flow in a porous medium. *Advances in Water Resources*, 85, 45–63. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2015.08.013>
- Wood, B. D., He, X., & Apte, S. V. (2020). Modeling turbulent flows in porous media. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 52, 171–203.

<https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-010719-060317>

Yi, J., Li, X., He, J., & Duan, X. (2019). Drying efficiency and product quality of biomass drying: a review. *Drying Technology*, 38(15), 2039–2054. <https://doi.org/10.1080/07373937.2019.1628772>

Younsi, R., Kocaefe, D., & Kocaefe, Y. (2006). Three-dimensional simulation of heat and moisture transfer in wood. *Applied Thermal Engineering*, 26(11–12), 1274–1285. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2005.10.029>

Zhan, J. F., Gu, J. Y., & Cai, Y. C. (2007). Analysis of moisture diffusivity of larch timber during convective drying condition by using Crank's method and Dincer's method. *Journal of Forestry Research*, 18(3), 199–202. <https://doi.org/10.1007/s11676-007-0040-x>

CONCLUSIONES GENERALES

El estudio de las características de secado de astillas de madera de *Pinus* spp. mediante modelos teóricos de transferencia de masa es de vital importancia en la optimización de procesos industriales de secado. Este enfoque permite una mejor comprensión de cómo variables clave como la velocidad del aire, la temperatura y el tamaño de las partículas influyen en la eficiencia del secado, la uniformidad de la humedad final y el consumo energético. La capacidad de predecir y controlar estos factores tiene implicaciones directas en la reducción de costos, la mejora de la calidad del producto final y la eficiencia del proceso en la industria maderera.

Una de las principales contribuciones de esta tesis radica en las ecuaciones novedosas que permiten, a partir de parámetros del aire, calcular con precisión la velocidad de secado y, por ende, estimar el tiempo necesario para el secado completo de la biomasa forestal. Esto se logra mediante modelos de regresión aplicados de manera innovadora, ofreciendo nuevas herramientas predictivas y estableciendo un procedimiento claro y replicable para su aplicación en la práctica.

Los resultados obtenidos en este estudio demuestran que el secado de astillas de madera no es un proceso lineal; la velocidad de secado disminuye con el tiempo y es afectada por factores como el tamaño de las partículas y las condiciones operativas como la velocidad del aire y temperatura. Se sugiere implementar un control automatizado que ajuste la velocidad del aire y la temperatura en función de la etapa del secado y el tamaño de las partículas, con el fin de maximizar la eficiencia energética y reducir la variabilidad en la humedad final del producto.

Por otro lado, el uso de modelos teóricos de transferencia de masa permite descomponer el proceso en sus componentes fundamentales, ofreciendo una visión más precisa de cómo interactúan las variables involucradas. Este enfoque no solo es relevante para la optimización del secado de madera, sino que también puede aplicarse en otros campos industriales donde el control de la humedad es crítico, como en la conservación de alimentos y la fabricación de materiales

compuestos, pero su precisión depende de la correcta determinación de variables críticas como la velocidad y temperatura del aire, y el tamaño de las partículas.

Asimismo, se demostró que para lograr una mayor precisión en la predicción de la velocidad de secado es esencial considerar tanto la variabilidad en las condiciones operativas como las características físicas de las astillas de madera. Para mejorar la exactitud en las mediciones y una comprensión más profunda del proceso de secado, se pueden implementar varias mejoras en el diseño del secador. Una estrategia viable es incorporar un sistema de monitoreo continuo que detecte variaciones en tiempo real. Además, realizar calibraciones periódicas de los sensores y validar los modelos teóricos con datos experimentales actualizados puede reducir significativamente los errores en las mediciones. Optimizar el diseño del secador para mejorar la predicción de la velocidad de secado incluye la instalación de sensores que midan en tiempo real el peso de las astillas durante el proceso, así como asegurar un flujo de aire uniforme en todos los tratamientos, minimizando zonas de baja velocidad o estancamiento que puedan afectar la uniformidad del secado.

Finalmente, se presenta en el anexo un ejemplo de aplicación que ilustra la utilización de los modelos desarrollados en esta investigación. Este ejemplo sirve para demostrar la aplicabilidad y efectividad de los cálculos en el ámbito práctico, facilitando su implementación en procesos industriales.

ANEXOS

Anexo 1. Valores obtenidos para la difusividad (D_w), el coeficiente de transferencia de masa por convección (h), el número de Reynolds (Re), y las velocidades de secado teóricas (\dot{m}_{sT}) para la longitud característica $L_{c-astillas}$ y la velocidad del aire v_1 .

T	P	D_w	Re	h $L_{c-ast.}$	h L_{c-D1}	h L_{c-D2}	\dot{m}_{sT} $L_{c-ast.}$	\dot{m}_{sT} L_{c-D1}	\dot{m}_{sT} L_{c-D2}
1	P_1	2.77×10^{-5}	2.77×10^{-5}	3857	0.1187	0.0167	0.0021	0.1621	0.0228
	P_2	2.77×10^{-5}	2.77×10^{-5}	19342	0.0624	0.0440	0.0055	0.0515	0.0363
2	P_1	2.78×10^{-5}	2.78×10^{-5}	4557	0.1312	0.0185	0.0023	0.1957	0.0276
	P_2	2.77×10^{-5}	2.77×10^{-5}	24441	0.0718	0.0506	0.0063	0.0637	0.0449
3	P_1	2.78×10^{-5}	2.78×10^{-5}	5326	0.1444	0.0203	0.0025	0.2513	0.0354
	P_2	2.77×10^{-5}	2.77×10^{-5}	26815	0.0759	0.0535	0.0067	0.0609	0.0429
4	P_1	2.96×10^{-5}	2.96×10^{-5}	3690	0.1230	0.0173	0.0022	0.2581	0.0363
	P_2	2.96×10^{-5}	2.96×10^{-5}	18653	0.0651	0.0458	0.0057	0.1002	0.0706
5	P_1	2.96×10^{-5}	2.96×10^{-5}	4346	0.1360	0.0192	0.0024	0.3627	0.0511
	P_2	2.96×10^{-5}	2.96×10^{-5}	21664	0.0712	0.0501	0.0062	0.0891	0.0628
6	P_1	2.96×10^{-5}	2.96×10^{-5}	5110	0.1500	0.0211	0.0026	0.3935	0.0554
	P_2	2.96×10^{-5}	2.96×10^{-5}	25749	0.0792	0.0558	0.0069	0.1290	0.0908
7	P_1	2.92×10^{-5}	2.92×10^{-5}	3739	0.1227	0.0173	0.0022	0.2998	0.0422
	P_2	2.99×10^{-5}	2.99×10^{-5}	18591	0.0657	0.0463	0.0058	0.1190	0.0838
8	P_1	3.06×10^{-5}	3.06×10^{-5}	4216	0.1380	0.0194	0.0024	0.3288	0.0463
	P_2	3.04×10^{-5}	3.04×10^{-5}	21200	0.0721	0.0508	0.0063	0.1274	0.0898
9	P_1	3.13×10^{-5}	3.13×10^{-5}	4876	0.1538	0.0217	0.0027	0.7180	0.1011
	P_2	3.12×10^{-5}	3.12×10^{-5}	24682	0.0811	0.0571	0.0071	0.2024	0.1425

T : tratamiento, P : tamaño de partícula (mm), D_w : difusividad ($m^2 s^{-1}$), Re : Reynolds, $h_{L_{c-ast.}}$, $h_{L_{c-D1}}$, y $h_{L_{c-D2}}$: coeficientes de transferencia de masa ($m s^{-1}$) calculados usando la $L_{c-astilla}$, L_{c-D1} , y L_{c-D2} como longitud característica, $\dot{m}_{sT_{L_{c-ast.}}}$, $\dot{m}_{sT_{L_{c-D1}}}$, y $\dot{m}_{sT_{L_{c-D2}}}$: velocidades de secado ($g s^{-1}$) calculadas usando la $L_{c-astilla}$, L_{c-D1} , y L_{c-D2} como longitud característica.

Anexo 2. Valores obtenidos para la difusividad (D_w), el coeficiente de transferencia de masa por convección (h), el número de Reynolds (Re), y las velocidades de secado teóricas (\dot{m}_{sT}) para la longitud característica L_{c-D1} y la velocidad del aire v_1 .

T	P	D_w	Re	h $L_{c-ast.}$	h L_{c-D1}	h L_{c-D2}	\dot{m}_{sT} $L_{c-ast.}$	\dot{m}_{sT} L_{c-D1}	\dot{m}_{sT} L_{c-D2}
1	P_1	2.77×10^{-5}	27,382	0.3847	0.0542	0.0067	0.5255	0.0740	0.0092
	P_2	2.77×10^{-5}	27,466	0.0771	0.0543	0.0068	0.0636	0.0448	0.0056
2	P_1	2.78×10^{-5}	32,358	0.4254	0.0599	0.0075	0.6343	0.0893	0.0111
	P_2	2.77×10^{-5}	34,707	0.0887	0.0624	0.0078	0.0786	0.0554	0.0069
3	P_1	2.78×10^{-5}	37,814	0.4680	0.0659	0.0082	0.8147	0.1148	0.0143
	P_2	2.77×10^{-5}	38,078	0.0937	0.0660	0.0082	0.0752	0.0530	0.0066
4	P_1	2.96×10^{-5}	26,196	0.3988	0.0562	0.0070	0.8365	0.1178	0.0147
	P_2	2.96×10^{-5}	26,487	0.0803	0.0565	0.0070	0.1237	0.0871	0.0108
5	P_1	2.96×10^{-5}	30,855	0.4410	0.0621	0.0077	1.1757	0.1656	0.0206
	P_2	2.96×10^{-5}	30,763	0.0879	0.0619	0.0077	0.1100	0.0775	0.0097
6	P_1	2.96×10^{-5}	36,280	0.4863	0.0685	0.0085	1.2756	0.1797	0.0224
	P_2	2.96×10^{-5}	36,564	0.0977	0.0688	0.0086	0.1591	0.1121	0.0140
7	P_1	2.92×10^{-5}	26,548	0.3977	0.0560	0.0070	0.9719	0.1369	0.0171
	P_2	2.99×10^{-5}	26,399	0.0811	0.0571	0.0071	0.1468	0.1034	0.0129
8	P_1	3.06×10^{-5}	29,936	0.4472	0.0630	0.0078	1.0659	0.1501	0.0187
	P_2	3.04×10^{-5}	30,103	0.0890	0.0627	0.0078	0.1573	0.1108	0.0138
9	P_1	3.13×10^{-5}	34,618	0.4985	0.0702	0.0087	2.3275	0.3278	0.0408
	P_2	3.12×10^{-5}	35,048	0.1001	0.0705	0.0088	0.2498	0.1759	0.0219

T : tratamiento, P : tamaño de partícula (mm), D_w : difusividad ($m^2 s^{-1}$), Re : Reynolds, $h_{L_{c-ast.}}$, $h_{L_{c-D1}}$, y $h_{L_{c-D2}}$: coeficientes de transferencia de masa ($m s^{-1}$) calculados usando la $L_{c-astilla}$, L_{c-D1} , y L_{c-D2} como longitud característica, $\dot{m}_{sT_{L_{c-ast.}}}$, $\dot{m}_{sT_{L_{c-D1}}}$, y $\dot{m}_{sT_{L_{c-D2}}}$: velocidades de secado ($g s^{-1}$) calculadas usando la $L_{c-astilla}$, L_{c-D1} , y L_{c-D2} como longitud característica.

Anexo 3. Valores obtenidos para la difusividad (D_w), el coeficiente de transferencia de masa por convección (h), el número de Reynolds (Re), y las velocidades de secado teóricas (\dot{m}_{sT}) para la longitud característica L_{c-D2} y la velocidad del aire v_1 .

T	P	D_w	Re	h $L_{c-ast.}$	h L_{c-D1}	h L_{c-D2}	\dot{m}_{sT} $L_{c-ast.}$	\dot{m}_{sT} L_{c-D1}	\dot{m}_{sT} L_{c-D2}
1	P_1	2.77×10^{-5}	219,824	13.9194	1.9605	0.2442	19.0138	2.6780	0.3336
	P_2	2.77×10^{-5}	220,502	2.7900	1.9648	0.2447	2.3022	1.6213	0.2020
2	P_1	2.78×10^{-5}	259,777	15.9152	2.2416	0.2792	23.7280	3.3420	0.4163
	P_2	2.77×10^{-5}	278,631	3.3637	2.3688	0.2951	2.9836	2.1011	0.2617
3	P_1	2.78×10^{-5}	303,578	18.0633	2.5441	0.3169	31.4434	4.4286	0.5516
	P_2	2.77×10^{-5}	305,694	3.6221	2.5508	0.3177	2.9068	2.0470	0.2550
4	P_1	2.96×10^{-5}	210,307	14.3013	2.0143	0.2509	29.9993	4.2252	0.5263
	P_2	2.96×10^{-5}	212,644	2.8857	2.0322	0.2531	4.4453	3.1305	0.3899
5	P_1	2.96×10^{-5}	247,712	16.3406	2.3015	0.2867	43.5676	6.1363	0.7643
	P_2	2.96×10^{-5}	246,973	3.2545	2.2919	0.2855	4.0743	2.8693	0.3574
6	P_1	2.96×10^{-5}	291,263	18.6117	2.6214	0.3265	48.8239	6.8766	0.8566
	P_2	2.96×10^{-5}	293,539	3.7463	2.6382	0.3286	6.1009	4.2964	0.5352
7	P_1	2.92×10^{-5}	213,130	14.2994	2.0140	0.2509	34.9490	4.9224	0.6131
	P_2	2.99×10^{-5}	211,935	2.9122	2.0508	0.2555	5.2737	3.7139	0.4626
8	P_1	3.06×10^{-5}	240,330	16.4710	2.3199	0.2890	39.2607	5.5297	0.6888
	P_2	3.04×10^{-5}	241,675	3.2822	2.3114	0.2879	5.7998	4.0844	0.5088
9	P_1	3.13×10^{-5}	277,917	18.9036	2.6625	0.3316	88.2544	12.4302	1.5483
	P_2	3.12×10^{-5}	281,371	3.8049	2.6795	0.3338	9.4944	6.6862	0.8328

T : tratamiento, P : tamaño de partícula (mm), D_w : difusividad ($m^2 s^{-1}$), Re : Reynolds, $h_{L_{c-ast.}}$, $h_{L_{c-D1}}$, y $h_{L_{c-D2}}$: coeficientes de transferencia de masa ($m s^{-1}$) calculados usando la $L_{c-astilla}$, L_{c-D1} , y L_{c-D2} como longitud característica, $\dot{m}_{sT_{L_{c-ast.}}}$, $\dot{m}_{sT_{L_{c-D1}}}$, y $\dot{m}_{sT_{L_{c-D2}}}$: velocidades de secado ($g s^{-1}$) calculadas usando la $L_{c-astilla}$, L_{c-D1} , y L_{c-D2} como longitud característica.

Anexo 4. Valores obtenidos para la difusividad (D_w), el coeficiente de transferencia de masa por convección (h), el número de Reynolds (Re), y las velocidades de secado teóricas (\dot{m}_{sT}) para la longitud característica $L_{c-astillas}$ y la velocidad del aire v_2 .

T	P	D_w	Re	h $L_{c-ast.}$	h L_{c-D1}	h L_{c-D2}	\dot{m}_{sT} $L_{c-ast.}$	\dot{m}_{sT} L_{c-D1}	\dot{m}_{sT} L_{c-D2}
1	P_1	2.77×10^{-5}	60	0.0171	0.0024	0.0003	0.0234	0.0033	0.0004
	P_2	2.77×10^{-5}	300	0.0077	0.0054	0.0007	0.0063	0.0045	0.0006
2	P_1	2.78×10^{-5}	71	0.0186	0.0026	0.0003	0.0277	0.0039	0.0005
	P_2	2.77×10^{-5}	379	0.0086	0.0061	0.0008	0.0076	0.0054	0.0007
3	P_1	2.78×10^{-5}	83	0.0202	0.0028	0.0004	0.0351	0.0049	0.0006
	P_2	2.77×10^{-5}	416	0.0090	0.0064	0.0008	0.0072	0.0051	0.0006
4	P_1	2.96×10^{-5}	57	0.0178	0.0025	0.0003	0.0374	0.0053	0.0007
	P_2	2.96×10^{-5}	289	0.0080	0.0056	0.0007	0.0123	0.0087	0.0011
5	P_1	2.96×10^{-5}	67	0.0194	0.0027	0.0003	0.0517	0.0073	0.0009
	P_2	2.96×10^{-5}	336	0.0086	0.0061	0.0008	0.0108	0.0076	0.0009
6	P_1	2.96×10^{-5}	79	0.0210	0.0030	0.0004	0.0552	0.0078	0.0010
	P_2	2.96×10^{-5}	400	0.0094	0.0066	0.0008	0.0154	0.0108	0.0013
7	P_1	2.92×10^{-5}	58	0.0177	0.0025	0.0003	0.0434	0.0061	0.0008
	P_2	2.99×10^{-5}	288	0.0081	0.0057	0.0007	0.0147	0.0103	0.0013
8	P_1	3.06×10^{-5}	65	0.0197	0.0028	0.0003	0.0470	0.0066	0.0008
	P_2	3.04×10^{-5}	329	0.0088	0.0062	0.0008	0.0155	0.0109	0.0014
9	P_1	3.13×10^{-5}	76	0.0217	0.0031	0.0004	0.1011	0.0142	0.0018
	P_2	3.12×10^{-5}	383	0.0097	0.0068	0.0009	0.0242	0.0171	0.0021

T : tratamiento, P : tamaño de partícula (mm), D_w : difusividad ($m^2 s^{-1}$), Re : Reynolds, h $L_{c-ast.}$, h L_{c-D1} , y h L_{c-D2} : coeficientes de transferencia de masa ($m s^{-1}$) calculados usando la $L_{c-astilla}$, L_{c-D1} , y L_{c-D2} como longitud característica, $\dot{m}_{sT} L_{c-ast.}$, $\dot{m}_{sT} L_{c-D1}$, y $\dot{m}_{sT} L_{c-D2}$: velocidades de secado ($g s^{-1}$) calculadas usando la $L_{c-astilla}$, L_{c-D1} , y L_{c-D2} como longitud característica.

Anexo 5. Valores obtenidos para la difusividad (D_w), el coeficiente de transferencia de masa por convección (h), el número de Reynolds (Re), y las velocidades de secado teóricas (\dot{m}_{sT}) para la longitud característica L_{c-D1} y la velocidad del aire v_2 .

T	P	D_w	Re	h $L_{c-ast.}$	h L_{c-D1}	h L_{c-D2}	\dot{m}_{sT} $L_{c-ast.}$	\dot{m}_{sT} L_{c-D1}	\dot{m}_{sT} L_{c-D2}
1	P_1	2.77×10^{-5}	425	0.0456	0.0064	0.0008	0.0623	0.0088	0.0011
	P_2	2.77×10^{-5}	426	0.0091	0.0064	0.0008	0.0075	0.0053	0.0007
2	P_1	2.78×10^{-5}	502	0.0496	0.0070	0.0009	0.0739	0.0104	0.0013
	P_2	2.77×10^{-5}	538	0.0103	0.0072	0.0009	0.0091	0.0064	0.0008
3	P_1	2.78×10^{-5}	587	0.0537	0.0076	0.0009	0.0935	0.0132	0.0016
	P_2	2.77×10^{-5}	591	0.0107	0.0076	0.0009	0.0086	0.0061	0.0008
4	P_1	2.96×10^{-5}	406	0.0475	0.0067	0.0008	0.0996	0.0140	0.0017
	P_2	2.96×10^{-5}	411	0.0095	0.0067	0.0008	0.0147	0.0104	0.0013
5	P_1	2.96×10^{-5}	479	0.0516	0.0073	0.0009	0.1377	0.0194	0.0024
	P_2	2.96×10^{-5}	477	0.0103	0.0072	0.0009	0.0129	0.0091	0.0011
6	P_1	2.96×10^{-5}	563	0.0560	0.0079	0.0010	0.1470	0.0207	0.0026
	P_2	2.96×10^{-5}	567	0.0113	0.0079	0.0010	0.0183	0.0129	0.0016
7	P_1	2.92×10^{-5}	412	0.0473	0.0067	0.0008	0.1155	0.0163	0.0020
	P_2	2.99×10^{-5}	410	0.0096	0.0068	0.0008	0.0175	0.0123	0.0015
8	P_1	3.06×10^{-5}	464	0.0525	0.0074	0.0009	0.1252	0.0176	0.0022
	P_2	3.04×10^{-5}	467	0.0104	0.0074	0.0009	0.0185	0.0130	0.0016
9	P_1	3.13×10^{-5}	537	0.0577	0.0081	0.0010	0.2694	0.0379	0.0047
	P_2	3.12×10^{-5}	544	0.0116	0.0081	0.0010	0.0289	0.0203	0.0025

T : tratamiento, P : tamaño de partícula (mm), D_w : difusividad ($m^2 s^{-1}$), Re : Reynolds, h $L_{c-ast.}$, h L_{c-D1} , y h L_{c-D2} : coeficientes de transferencia de masa ($m s^{-1}$) calculados usando la $L_{c-astilla}$, L_{c-D1} , y L_{c-D2} como longitud característica, $\dot{m}_{sT} L_{c-ast.}$, $\dot{m}_{sT} L_{c-D1}$, y $\dot{m}_{sT} L_{c-D2}$: velocidades de secado ($g s^{-1}$) calculadas usando la $L_{c-astilla}$, L_{c-D1} , y L_{c-D2} como longitud característica.

Anexo 6. Valores obtenidos para la difusividad (D_w), el coeficiente de transferencia de masa por convección (h), el número de Reynolds (Re), y las velocidades de secado teóricas (\dot{m}_{sT}) para la longitud característica L_{c-D2} y la velocidad del aire v_2 .

T	P	D_w	Re	h $L_{c-ast.}$	h L_{c-D1}	h L_{c-D2}	\dot{m}_{sT} $L_{c-ast.}$	\dot{m}_{sT} L_{c-D1}	\dot{m}_{sT} L_{c-D2}
1	P_1	2.77×10^{-5}	3,411	0.1102	0.0155	0.0019	0.1506	0.0212	0.0026
	P_2	2.77×10^{-5}	3,421	0.0221	0.0156	0.0019	0.0182	0.0128	0.0016
2	P_1	2.78×10^{-5}	4,031	0.1219	0.0172	0.0021	0.1818	0.0256	0.0032
	P_2	2.77×10^{-5}	4,323	0.0254	0.0179	0.0022	0.0225	0.0159	0.0020
3	P_1	2.78×10^{-5}	4,710	0.1341	0.0189	0.0024	0.2335	0.0329	0.0041
	P_2	2.77×10^{-5}	4,743	0.0269	0.0189	0.0024	0.0216	0.0152	0.0019
4	P_1	2.96×10^{-5}	3,263	0.1143	0.0161	0.0020	0.2397	0.0338	0.0042
	P_2	2.96×10^{-5}	3,299	0.0230	0.0162	0.0020	0.0354	0.0250	0.0031
5	P_1	2.96×10^{-5}	3,843	0.1264	0.0178	0.0022	0.3369	0.0475	0.0059
	P_2	2.96×10^{-5}	3,832	0.0252	0.0177	0.0022	0.0315	0.0222	0.0028
6	P_1	2.96×10^{-5}	4,519	0.1393	0.0196	0.0024	0.3655	0.0515	0.0064
	P_2	2.96×10^{-5}	4,554	0.0280	0.0197	0.0025	0.0456	0.0321	0.0040
7	P_1	2.92×10^{-5}	3,307	0.1140	0.0161	0.0020	0.2785	0.0392	0.0049
	P_2	2.99×10^{-5}	3,288	0.0232	0.0164	0.0020	0.0421	0.0296	0.0037
8	P_1	3.06×10^{-5}	3,729	0.1282	0.0180	0.0022	0.3055	0.0430	0.0054
	P_2	3.04×10^{-5}	3,750	0.0255	0.0180	0.0022	0.0451	0.0317	0.0040
9	P_1	3.13×10^{-5}	4,312	0.1429	0.0201	0.0025	0.6670	0.0939	0.0117
	P_2	3.12×10^{-5}	4,366	0.0287	0.0202	0.0025	0.0716	0.0504	0.0063

T : tratamiento, P : tamaño de partícula (mm), D_w : difusividad ($m^2 s^{-1}$), Re : Reynolds, h $L_{c-ast.}$, h L_{c-D1} , y h L_{c-D2} : coeficientes de transferencia de masa ($m s^{-1}$) calculados usando la $L_{c-astilla}$, L_{c-D1} , y L_{c-D2} como longitud característica, $\dot{m}_{sT} L_{c-ast.}$, $\dot{m}_{sT} L_{c-D1}$, y $\dot{m}_{sT} L_{c-D2}$: velocidades de secado ($g s^{-1}$) calculadas usando la $L_{c-astilla}$, L_{c-D1} , y L_{c-D2} como longitud característica.

Aplicación práctica

En este ejemplo, se realizará el cálculo de la velocidad de secado de astillas utilizando un secador de aire caliente por convección. Las condiciones operativas y las propiedades de la biomasa se describen a continuación:

1. Secador de aire caliente:

- Consumo de astillas secas: El secador procesa 2,500 kg de astillas secas por hora, manteniendo una carga constante en operación.
- Volumen ocupado por las astillas: Las astillas ocupan el 90% del volumen total del secador, lo que significa que el espacio restante del 10% está destinado al flujo del aire.
- Flujo de aire: El aire caliente es introducido por la parte inferior del secador y fluye en sentido ascendente, asegurando un contacto directo con las astillas.

2. Propiedades del aire de secado:

- Temperatura del aire: 50°C, una temperatura empleada para optimizar la eficiencia de secado sin comprometer la calidad de la biomasa.
- Humedad relativa: El aire de secado tiene una humedad relativa del 40%, lo que influye en la capacidad del aire para absorber el vapor de agua liberado por las astillas.
- Velocidad del aire: El aire se introduce a una velocidad de 10 m/s, lo que favorece la transferencia de masa y la evaporación de la humedad de las astillas.

3. Propiedades de las astillas:

- Dimensiones de las astillas: la biomasa está constituida por astillas de madera con una longitud de 5 cm y un diámetro de 3 cm.
- Densidad aparente de las astillas: 150 kg/m³, que representa la densidad del conjunto de las astillas, considerando el espacio entre ellas.
- Densidad básica de la madera: 400 kg/m³, una propiedad inherente al material de las astillas que influye en la cantidad de humedad retenida.

A partir de estas condiciones, se pretende calcular la velocidad de secado de las astillas de madera, utilizando los modelos de transferencia de masa. Los cálculos

incluirán la estimación del coeficiente de transferencia de masa por convección y la determinación del número de Reynolds y Schmidt, para el cálculo del número de Sherwood, considerando las propiedades físicas tanto del aire como de la biomasa.

Debido al que el secado es por convección, el flujo de agua desecado por unidad de tiempo (\dot{m}_w) se calculará con la ecuación:

$$\dot{m}_w = h_m \cdot \rho_{aire} \cdot A \cdot (\omega_a - \omega_{sat})$$

Donde:

\dot{m}_w : masa de agua desecada por unidad de tiempo (g/s)

h_m : coeficiente de transferencia de masa por convección (m/s)

ρ_{aire} : densidad del aire (g/m³)

A : área de transferencia.

Se ha de calcular la densidad del aire con la ecuación:

$$\rho_{aire} = \frac{P \cdot M_{aire}}{R \cdot T} = \frac{1 \cdot 28.96}{0.082 \cdot (273.15 + 50)} = 1.0929 \text{ kg m}^{-3}$$

Donde:

T : temperatura del aire (K)

M_{aire} : peso molecular del aire (28.96 g/mol)

P : presión del aire (atmósferas)

R : constante universal de los gases (0.08205746 L·atm/mol K).

Con la temperatura tomada antes de que el air esté en contacto con las astillas se ha de calcular la presión de vapor saturado:

$$P_{vapor-sat} = 10^{\left(\frac{10.2858 \cdot T + 661}{T + 237.3}\right)} = 10^{\left(\frac{10.2858 \cdot 50 + 661}{50 + 237.3}\right)} = 12,325.68 \text{ Pa}$$

Donde:

T : temperatura del aire (°C)

$P_{vapor-sat}$: presión de vapor saturado (Pa).

Se calcula la humedad de saturación como sigue:

$$\omega_{a-sat} = 0.622 \frac{P_{vapor-sat}}{P - P_{vapor-sat}} = 0.622 \frac{12,325.68}{101325 - 12,325.68} = 0.0861 \text{ g}_{agua}/\text{g}_{aire}$$

Donde:

P : presión atmosférica (Pa).

A partir de la humedad relativa del aire antes de entrar en contacto con las astillas se calcula la presión de vapor:

$$HR = \frac{P_{vapor}}{P_{vapor-sat}} \cdot 100 \rightarrow P_{vapor} = \frac{HR}{100} \cdot P_{vapor-sat} = \frac{40}{100} \cdot 12,325.68 = 4,930.27 \text{ Pa}$$

A partir de la presión de vapor se calcula la humedad absoluta del aire como sigue:

$$\omega_a = 0.622 \frac{P_{vapor}}{P - P_{vapor}} = 0.622 \frac{4,930.27}{101325 - 4,930.27} = 0.0318 \text{ g}_{agua}/\text{g}_{aire}$$

A partir de la velocidad de circulación y propiedades termodinámicas del aire, se calcula el número de Reynolds (Re), la difusividad (D_w) y el número de Schmidt (Sc):

$$Re = \frac{v \cdot \rho_{aire} \cdot L_{c-astillas}}{\mu} = \frac{10 \cdot 1.0929 \cdot 0.05}{2.02 \times 10^{-5}} = 27,200$$

$$D_w = 1.87 \cdot 10^{-10} \frac{T^{2.072}}{P} = 1.87 \cdot 10^{-10} \frac{(273.15 + 50)^{2.072}}{1} = 2.96 \times 10^{-5} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$$

$$Sc = \frac{\mu}{D_w \cdot \rho_{aire}} = \frac{2.13 \times 10^{-5}}{2.96 \times 10^{-5} \cdot 1.0929} = 0.6602$$

Donde:

v : velocidad de circulación del aire tomada antes del contacto con las astillas en el secador (m/s)

ρ_{aire} : densidad del aire (kg/m^3)

$L_{c-astillas}$: longitud característica, que la tomaremos como el diámetro medio de las astillas si son cilíndricas, es decir 0.05 m

μ : viscosidad dinámica del aire (Pa/s)

D_w : difusividad del agua en el material (m^2/s).

El número de Sherwood (Sh) se calcula a partir de la analogía con los procesos de transferencia de calor con el número de Reynolds (Re) y el número de Schmidt (Sc), donde Schmidt reemplaza al número de Prandtl, y Sc_s es el número de Schmidt en la superficie de transferencia de masa:

$$Sh = f(Re, Sc)$$

$$(1000 < Re < 2 \cdot 10^5, Sc > 0.5)$$

$$Sh = 0.35 \cdot Re^{0.6} \cdot Sc^{0.36} \cdot (Sc/Sc_s)^{0.25}$$

Entonces:

$$Sh = 0.35 \cdot 27,200^{0.6} \cdot 0.6602^{0.36} \cdot (1)^{0.25} = 138$$

Donde:

Sh : número adimensional de Sherwood

Re : número adimensional de Reynolds

Sc : número adimensional de Schmidt

Sc_s es el número de Schmidt en la superficie de transferencia de masa. Vamos a tomar que $Sc/Sc_s = 1$.

El coeficiente de transferencia de masa por convección (h) se obtiene a partir del número de Sherwood, la difusividad y la longitud característica (L_c) como sigue:

$$h = \frac{Sh \cdot D_w}{L_{c-astillas}} = \frac{138 \cdot 2.96 \times 10^{-5}}{0.05} = 0.0812 \text{ m s}^{-1}$$

Donde

h_m : coeficiente de transferencia de masa por convección (m/s)

Sh : número de Sherwood

D_w : difusividad de agua en el material (m^2/s)

$L_{c-astillas}$: longitud característica (0.05 m).

El área de transferencia (A) se calcula a partir de las dimensiones de las partículas y el número de partículas en el secador. El área y volumen medios de cada astilla vendrán dados por:

$$A_{partícula} = \pi \cdot d \cdot l + \pi \frac{d^2}{2} = \pi \cdot 0.03 \cdot 0.05 + \pi \frac{0.03^2}{2} = 0.0061 \text{ m}^2/\text{partícula}$$

$$V_{partícula} = \pi \frac{d^2}{4} l = \pi \frac{0.03^2}{4} 0.05 = 3.53 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{partícula}$$

Donde:

π : número pi

d : diámetro medio de las astillas (m)

l : longitud media de las astillas (m).

El número de partículas por silo se determina de la siguiente manera:

$$m_{partícula} = V_{partícula} \cdot \rho = 3.53 \times 10^{-5} \cdot 400 = 0.014 \text{ kg/partícula}$$

$$N_{partículas/m^3} = \frac{\rho_a}{m_{partícula}} = \frac{150}{0.014} = 10,714.28 \text{ partículas/m}^3$$

$$V_s = k_s \cdot \frac{m_s}{\rho_s} = \frac{1}{0.9} \cdot \frac{2,500}{150} = 18.52 \text{ m}^3$$

$$N_{partículas/silo} = N_{partículas/m^3} \cdot V_s = 10,714.28 \cdot 18.52 = 198,428.46 \text{ partículas/silo}$$

Donde

$m_{partícula}$: masa de la astilla (kg/partícula)

$V_{partícula}$: volumen de la astilla (m³/partícula)

ρ : densidad básica de la madera (kg/m³)

$N_{partículas/m^3}$: número de partículas por metro cúbico (partículas/m³)

ρ_a : densidad aparente (kg/m³)

V_s : volumen del secador (m³)

k_s : coeficiente mayorante dependiente de la configuración del apilado y de las piezas

m_s : masa a desecar (kg)

ρ_s : densidad del material seco (kg/m³).

Entonces se obtiene el cálculo del área de transferencia:

$$A = N_{particulas/silo} \cdot A_{particula} = 198,428.46 \cdot 0.0061 = 1,210.41 \text{ m}^2$$

Finalmente aplicamos la ecuación para determinar el flujo de agua desecado por unidad de tiempo (\dot{m}_w):

$$\dot{m}_w = h_m \cdot \rho_{aire} \cdot A \cdot (\omega_a - \omega_{sat})$$

$$\dot{m}_w = 0.0812 \cdot 1.0929 \cdot 1,210.41 \cdot (0.0861 - 0.0318) = 5.83 \text{ kg de agua / segundo}$$

En términos más prácticos, se puede interpretar este valor como una tasa de secado. Esto indica que el sistema de secado, bajo las condiciones establecidas (velocidad y temperatura del aire, humedad relativa), está logrando extraer dicha cantidad de agua de la biomasa en cada segundo de operación.

Este valor es relevante para evaluar la eficiencia del secador y el tiempo necesario para secar completamente una carga de astillas, así como para diseñar o ajustar el sistema para que cumpla con los objetivos de secado.