

Nota técnica

Desarrollos tecnológicos de hornos para el secado de especies maderables venezolanas

G. Navarro ^{1,*} , Y. Guerrero , J. Hernández , M. Henríquez .

¹ Gerencia de Proyectos de Investigación, Desarrollo e innovación, Centro Nacional de Tecnología Química, Caracas, Venezuela.

Resumen

La madera es un material higroscópico que experimenta absorción o desorción continua de humedad hasta alcanzar el equilibrio con sus alrededores, por lo que su comportamiento se encuentra sujeto al contenido de agua que cada especie es capaz de almacenar. Con el fin de obtener productos con altos estándares de calidad es propicio realizar un correcto secado de la madera que evite la aparición de fracturas, grietas, decoloraciones, la proliferación de hongos y de termitas en el material; mediante el uso de hornos de secado. Así, el objetivo de la presente nota técnica es destacar las tecnologías de secado artificial empleadas actualmente que logren proveer una metodología eficiente para la industria maderera venezolana. El análisis se realizó a través de la revisión de artículos científicos y de patentes en las bases de datos de las plataformas *Google Académico* y *The Lens®* en el lapso 2018 – 2022. Como resultado fue posible la identificación de cinco desarrollos tecnológicos principales para el secado de la madera en hornos: convencional, al vacío, deshumidificador, microondas y solar. El empleo de cada una de estas tecnologías depende de diversos factores, dentro de los que se destacan la especie a secar, espesor de la madera, contenido de humedad inicial, infraestructura, etc.

Palabras clave: Madera, horno de secado, hongos, patentes



Recibido: 24 de noviembre del 2022

Aceptado: 16 de enero del 2022

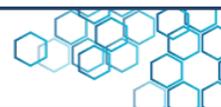
Publicado: 9 de junio del 2023

Conflicto de intereses: los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

DOI:
<https://www.doi.org/10.5281/zenodo.8355956>

***Autor para correspondencia:**
Gabriela Navarro

e-mail: gpidi@gmail.com



Technical note

Technological developments of kilns for drying of Venezuelan timber species.

G. Navarro ^{1,*} , Y. Guerrero , J. Hernández , M. Henríquez .

¹ Gerencia de Proyectos de Investigación, Desarrollo e innovación, Centro Nacional de Tecnología Química, Caracas, Venezuela.

Abstract

Wood is a hygroscopic material that undergoes continuous moisture absorption or desorption until it reaches equilibrium with its surroundings, so its behavior is subject to the water content that each species is capable of storing. In order to obtain products with high quality standards, it is propitious to carry out a correct drying of the wood that prevents the appearance of fractures, cracks, discoloration, the proliferation of fungi and termites in the material; through the use of drying kilns. Thus, the objective of this technical note is to highlight the artificial drying techniques currently used that manage to provide an efficient methodology for the Venezuelan timber industry. The analysis was carried out through the review of scientific articles and patents in the databases of the *Google Scholar* and *The Lens®* platforms in the period 2018 - 2022. As a result, it was possible to identify five main techniques for drying wood in kilns: conventional, vacuum, dehumidifier, microwave and solar. The use of each of these technologies depends on various factors, among which the species to be dried, thickness of the wood, initial moisture content, infrastructure, etc.

Key words: Wood, drying oven, mushrooms, patents



Received: November 24, 2022

Accepted: January 16, 2022

Published: June 9, 2023

Conflict of interest: the authors declare that there are no conflicts of interest.

DOI:

<https://www.doi.org/10.5281/zenodo.8355956>

***Autor para**

correspondencia:

Gabriela Navarro

e-mail: gpidi@gmail.com



1. Introducción

La madera es uno de los elementos más antiguos de la construcción, decoración, diseño y confección de mueblería, así como, su documentado uso como combustible. La industria maderera por lo general se abastece de materia prima con alto contenido de humedad, que puede alcanzar hasta un 200 % (m/m) dependiendo de la especie [1]. Sin embargo, para la mayoría de las finalidades de la madera, es determinante reducir su contenido de agua antes de la manufactura, debido a que su presencia, es inversamente proporcional a la durabilidad, comodidad, funcionalidad y acabado de los productos derivados [2].

Dado que la madera es un material higroscópico, su volumen aumenta o disminuye dependiendo de la disponibilidad de agua en el ambiente, por lo que la humedad juega un papel fundamental en las características del material, que incluyen resistencia a la descomposición, propiedades mecánicas y dimensiones. Mediante el secado de la madera se reduce la generación de deformaciones, fracturas, estrías y otros efectos no deseados de un proceso no controlado, la presencia de plagas que afecten la estética del material y se garantiza una aplicación más eficiente y duradera de preservativos, pinturas y otros acabados [3, 4]

El secado de la madera puede ser entendido como el equilibrio entre la transferencia de calor del flujo de aire a la superficie de la madera y el transporte de agua de la superficie de la madera al flujo de aire, definido como arrastre de vapor de agua y desplazamiento de agua respectivamente [5]. El secado en la industria maderera es un proceso



complejo que responde a diversos factores, destacándose aquellos propios del material, así como el tipo de secado. En general, se presentan dos tipos de secado de madera: secado natural y secado artificial. Siendo este último el concerniente a esta investigación, se emplea con el fin de reducir el tiempo de secado, aumentar la homogeneidad del producto y precisión del contenido de humedad mediante el uso de hornos de secado [2].

El objetivo de esta nota técnica es proveer una visión general de las tecnologías mencionadas con el fin de ser aplicables en la industria maderera venezolana, siendo importante mencionar que el 84,60 % de la producción nacional recae en la especie Pino Caribe ((*Pinus caribaea* var. *hondurensis* (Sénécl.)), proveniente de los campos de Uverito, estado Monagas; seguido por las especies Acacia (*Fabaceae*) y Eucalipto (*Eucalyptus*).

2. Metodología

A partir de una recopilación de literatura de diversos tipos de documentos como artículos de revisión, artículos científicos y patentes en las principales bases de datos de naturaleza científica y tecnológica, se realizó la búsqueda de información empleando la plataforma *Google Académico*, usando la ecuación de búsqueda mostrada en la Tabla 1, con el fin de obtener las palabras claves más relevantes para la investigación.

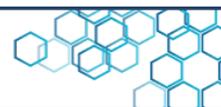
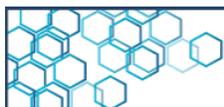


Tabla 1. Búsqueda inicial de artículos.

| Ecuación de búsqueda | Filtros | Número de documentos |
|---|---------------------------------------|-----------------------------|
| (Wood or lumber) AND (Drying) AND (kiln) | 2018-2022 Artículos de revisión | 1.960 |

En la Tabla 2, se detallan las ecuaciones de búsqueda en la plataforma *The Lens®*, empleadas para obtener documentos con información más detallada de las diferentes tecnologías y metodologías empleadas actualmente en la industria maderera.

Tabla 2. Búsqueda final de artículos.

| Ecuación de búsqueda | Filtros | Número de documentos |
|-----------------------------------|----------------|-----------------------------|
| (Wood) AND (drying) AND (Kiln) | 2018-2022 | 41 |

Para la obtención de documentos de propiedad intelectual fue empleada la plataforma *The Lens®*, mediante los filtros de fecha de publicación, familia y códigos CPC (Cooperative Patent Classification en inglés) e IPC (International Patent Classification, en inglés), la información detallada aparece reflejada en la Tabla 3.

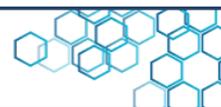
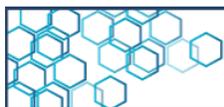


Tabla 3. Ecuación de búsqueda de documentos de propiedad intelectual

| Ecuación de búsqueda | Filtros | Números de documentos |
|--|--|-----------------------|
| (Wood) AND (Drying) AND (Kiln) AND (class_cpc.symbol:(F26B2210\16* OR F26B25\22* OR F26B3\04* OR B27K3\08* OR B27K5\0085* OR F26B9\06*)) | 2018-2022 1 sola patente por familia Códigos CPC | 139 |
| (Wood) AND (Drying) AND (Kiln) AND (class_ipcr.symbol:(F26B3* OR F26B7* OR F26B11)) | 2018-2022 1 sola patente por familia Códigos IPC | 53 |

3. Discusión de resultados

Un adecuado secado de la madera puede prevenir la aparición de grietas, fracturas, coloraciones no deseadas y hongos, por lo que la industria maderera ha concentrado sus esfuerzos en el desarrollo de tecnologías que garanticen un secado eficiente, a un menor tiempo y con resultados homogéneos. A continuación, se analiza y resaltan las tecnologías más relevantes empleadas por la industria.

La búsqueda realizada en *The Lens*®, arrojó un universo de 381 documentos en el periodo 2018-2022, con un promedio de



45 documentos por año, tal como se muestra en la Figura 1. La frecuencia de publicación de artículos tiene un comportamiento cíclico en el tiempo. El mayor número de publicaciones corresponde al año 2019 y ha tenido un decrecimiento hasta su punto más abajo en el año 2022.

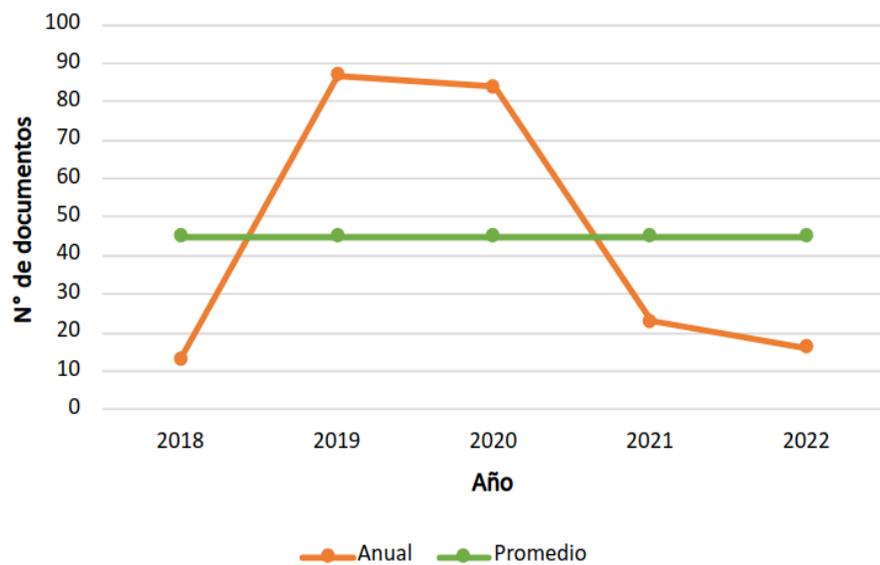
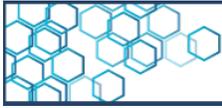


Figura 1. Número de publicaciones anuales y promedio. Fuente: Base de datos The Lens®. Elaboración propia del autor, 2023.

3.1 Tipos de hornos

3.1.1 Hornos de secado convencional



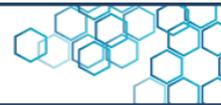
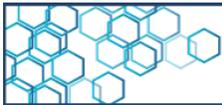
Franick *et al.*, (2014) menciona que los hornos de secado convencionales operan con base al principio de evaporar el agua contenida en la madera a altas temperaturas. En un estado inicial el agua libre en las células de la madera se evapora. Posteriormente, el agua contenida en las paredes celulares de la madera es evaporada también, lo que requiere la ruptura de los enlaces de hidrógeno entre las moléculas de agua y los polímeros tanto de celulosa como de hemicelulosa en la pared celular. En su forma más simple, el secado en horno se lleva a cabo a presión atmosférica con aire caliente circulado por un ventilador a temperaturas que oscilan aproximadamente entre 70°C y (100–120) °C o más. Por lo general, los hornos convencionales utilizan el calor de las calderas de vapor alimentadas principalmente por residuos de aserraderos y algunos combustibles fósiles [6].

Loiola *et al.*, [7], realizaron un estudio del secado de la especie *Hovenia dulcis*, para evaluar el comportamiento de secado mediante hornos convencionales. Fueron empleadas 66 muestras de 25 mm x 70 mm con una humedad inicial de 57 %. Constó con tres etapas: 6 horas de la fase inicial de secado a 62 °C, 4 horas de estandarización a 62 °C y 6 horas de acondicionamiento a 45 °C, para finalmente alcanzar un 12 % de humedad. No fueron reportados hechos significativos en cuanto a la calidad de la madera obtenida. Sin embargo, a partir de las características de masa y porcentaje de humedad inicial, la especie fue clasificada como madera dura, lo que incrementa las dificultades asociadas a su secado.



3.1.2 Hornos solares

Las tecnologías de secado alternativas que utiliza un horno solar proporcionan un ahorro de energía significativo, en comparación con los hornos convencionales. Por medio de colectores solares se calienta el aire, que luego es conducido directamente a la cámara de secado. Explican Phonetip *et al.*, [8], que su costo operativo es hasta un 80 % menor que el de los hornos calentados con vapor, según el diseño y la capacidad del horno. Sin embargo, el uso de esta tecnología es afectada por múltiples factores geográficos y las condiciones climáticas de la zona de implementación. Para este estudio, fueron empleadas muestras de madera de 40 mm x 100 mm de la especie *Eucalyptus delegatensis*. Una unidad de control permitió el establecimiento de la temperatura y humedad relativa. El cronograma de secado contempló dos fases, con humedad relativa de 60 % y 80 % respectivamente. La temperatura no es estable en este tipo de hornos, debido a que depende de la energía solar, por lo que presentó oscilaciones entre los 15 °C y 49 °C. El proceso de secado tomó alrededor de 90 días. A los 25 días, la humedad contenida ya alcanzaba un 25 % del porcentaje inicial de 65 %, y en 62 días adicionales correspondía a 12 %. Sin embargo, fue notorio la aparición de algunas fracturas o estillas internas, que pudiesen haber sido provocadas por la inestabilidad de las temperaturas experimentadas.

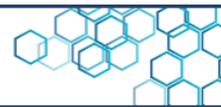
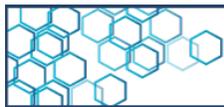


3.1.3 Hornos deshumidificadores

Los hornos de secado de madera con sistemas deshumidificadores tienen como principio la remoción de la humedad mediante la aplicación o circulación de aire caliente mediante ventiladores de circulación que permiten la evaporación del agua contenida, pero a diferencia de los hornos convencionales, estos permiten reciclar el calor en lugar de expulsarlo. Alikhani *et al.* [9], expone una hipótesis basada en que el ahorro de energía se puede lograr cuando el aire seco se separa del aire de escape húmedo y caliente y se redirige al horno, por lo que es un proceso energéticamente más eficiente. Las desventajas asociadas a este tipo de secado recaen en las temperaturas máximas utilizadas, las cuales rondan los 60 °C – 70 °C.

3.1.4 Hornos al vacío

Entre los métodos disponibles, esta es una alternativa interesante que produce madera seca rápidamente en condiciones de baja temperatura y presión. He *et al.* [10], seleccionaron muestras aleatorias de la especie *Juglans regia* de dimensiones 200 mm x 100 mm x 20 mm y con una humedad inicial en el rango de (50 – 53) %. La metodología de secado se llevó a cabo a una temperatura de 80 °C y a una presión absoluta de 0,02 MPa. Tomó 768 minutos reducir el contenido de humedad inicial hasta 12 %, lo que sugiere una disminución en el tiempo respecto al método convencional. De igual manera, este estudio mostró que el



contenido de humedad y la velocidad de secado decrecen al pasar el tiempo.

Por otra parte, Lyon *et al.* [11], describen las aplicaciones ideales para los hornos al vacío, que incluyen especies de madera de alto valor, difíciles de secar, grandes secciones de troncos y madera aserrada, chapas decorativas o gruesas y operaciones de carpintería a pequeña escala. Así mismo, plantean los desafíos del uso de esta tecnología a escala industrial asociados a una logística rigurosa, alto costo de mantenimiento de equipos, avanzados conocimientos en el modelo de horno a utilizar, alta probabilidad de sobrecalentamiento de la carga, inhabilidad de proveerle acondicionamiento posterior al ciclo (esencial para reducir aparición de grietas y astillas) y finalmente un costo elevado de secado de ciertas especies.

3.1.5 Hornos microondas

Esta tecnología suele asociarse al secado de piezas de madera de especies gruesas, largas y refractarias. Permite una temperatura de trabajo baja y mejora la relación entre calidad, tiempo y costo. En cuanto a la calidad de la madera obtenida, se ha observado una menor ocurrencia de grietas superficiales e internas, colapso y contracciones. Al mismo tiempo, también disminuye el tiempo de secado y podría generar un mayor rendimiento económico [12].

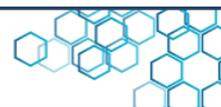
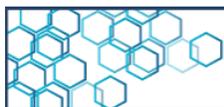
Freoget *et al.* [13], desarrollaron en Venezuela un método de secado a escala de laboratorio para probetas de madera de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* (Sénécl.), utilizando radiación electromagnética en el rango



de las microondas, alrededor de 2,45 GHz, suministrada a través de un horno de microondas doméstico (HMO). Se sometieron 15 probetas de 25 mm x 25 mm x 100 mm a periodos de irradiación seguidos de periodos de descanso. El tiempo de irradiación se acortó a medida que el proceso avanzaba, pasando de 3 minutos iniciales a 30 segundos en la etapa final. El tiempo total del proceso alcanzó 113 minutos, con una exposición microondas de 18 minutos y un porcentaje de pérdida de humedad de 98 %. La única alteración anatómica observada fue un aumento de agrietamientos espiralados en las paredes de las traqueidas.

3.1.6 Secado supercrítico

Todos estos métodos requieren el cambio de la fase del agua contenida en las células de la madera de líquido a vapor, lo que implica que estos sean procesos con un alto gasto de energía y requiere la ruptura de los enlaces de hidrógeno entre las moléculas de agua y los polímeros de la pared celular de madera (celulosa y hemicelulosas). Una alternativa para el secado en horno de madera, es extraer el contenido de agua a través de la interacción molecular del dióxido de carbono supercrítico con el agua de las células de la madera, mediante ciclos de presurización y despresurización. Cuando la presión del sistema se reduce por debajo del punto crítico, se produce un cambio de fase de fluido supercrítico a gas, con el consiguiente gran cambio en el volumen de CO₂. Esta investigación concluye que, a pesar de los varios ciclos de presurización y despresurización, la estructura celular y la anatomía de



la madera no es alterada. Aunado a lo anterior, el aspecto físico de la madera, como la posible aparición de manchas, fue disminuido [6].

En la Tabla 4, se muestra un resumen de las tecnologías empleadas en la industria maderera para el secado artificial mediante hornos, con los parámetros más significativos asociados a cada estudio.

Tabla 4. Resumen de tecnologías para el secado de madera en hornos

| Tecnología | Autor | Especie | Temperatura (°C) | Tiempo (Horas) | Humedad inicial (% m/m) |
|-------------------|-----------------------------|--|-------------------------|----------------------|-------------------------|
| Convencional | Loiola et al., (2022) [7] | <i>Hovenia Dulcis</i> | F1 62 FE 62 FA 45 | F1 6 F2 4 FA 6 | 57 |
| Solar | Phonetip et al., (2018) [8] | <i>Eucaliptus delegatensis.</i> | 15 – 49 | 2160 | 65 |
| Deshumidificadora | Alikhani et al., (2020) [9] | - | 60 – 70 | - | - |
| Vacío | He et al., (2019) [10] | <i>Juglans regia</i> | 80 | 12,8 | 50 – 53 |
| Microondas | Freoget et al., (2022) [13] | <i>Pinus caribaea</i> var. <i>hondurensis</i> (Sénécl.) | 61 – 135 | 1,88 | 107 |

F1: Fase, F2: Fase 2, FE: Fase de estandarización, FA: fase de acondicionamiento

3.2 Documentos de propiedad intelectual

De acuerdo a la base de datos de *The Lens*®, el año 2018 corresponde al de mayor número de patentes solicitadas en los últimos años, asociadas a invenciones con secado de madera mediante la aplicación de hornos, ver Figura 2. A partir del año 2019, se encuentra en un descenso continuo hasta llegar a su punto más bajo correspondiente al año 2022, con tan solo cuatro publicaciones. El promedio de publicaciones en estos cuatro años corresponde a 27 documentos, de los cuales solo los años 2021 y 2022 se encuentran por debajo.

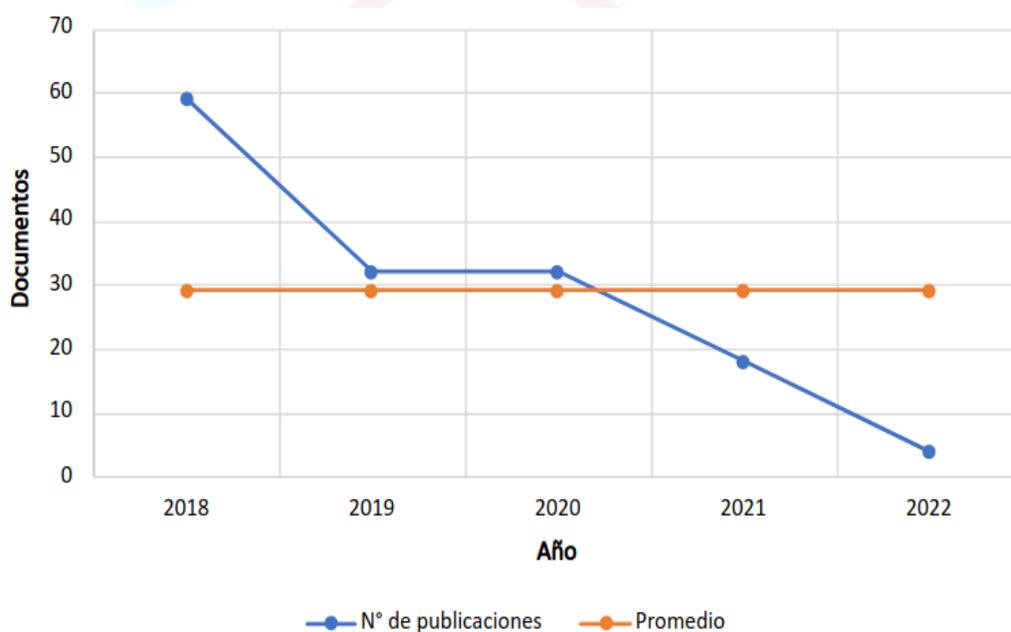
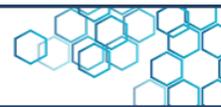
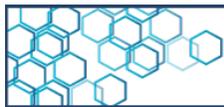


Figura 2. Número de solicitudes anuales. Fuente: Base de datos *The Lens*®. Elaboración propia del autor, 2023



La ecuación que incluye los códigos IPC, como se muestra en la Tabla 3, arrojó un menor número de documentos en comparación con la ecuación que emplea los códigos CPC. Gran parte de los documentos obtenidos con códigos IPC son provenientes de China, encontrándose en su totalidad como “documentos no disponibles” en la plataforma *The Lens*®.

Al revisar los 139 documentos obtenidos para la ecuación: (Wood) AND (Drying) AND (Kiln) AND (class_cpc.symbol:(F26B2210\16* OR F26B25\22* OR F26B3\04* OR B27K3\08* OR B27K5\0085* OR F26B9\06*)), que se reflejan en la Tabla 3, los resultados fueron acotados a 104 documentos, debido a que el resto no cumplía con las necesidades planteadas para esta investigación.

En cuanto a las compañías con mayor número de solicitudes de patentes (Figura 3), se encuentra *Usnr LLC*, con 12 documentos de propiedad intelectual, siendo esta a nivel mundial una de las más grandes distribuidoras de productos y tecnologías para el procesamiento y manufactura de madera a escala industrial. *Koppers Performance Chemicals INC* le sigue con ocho aplicaciones y *Electronics for imaging INC* con seis aplicaciones. La primera de ellas líder global en el desarrollo progresivo de sistemas y tecnologías de preservación de madera.

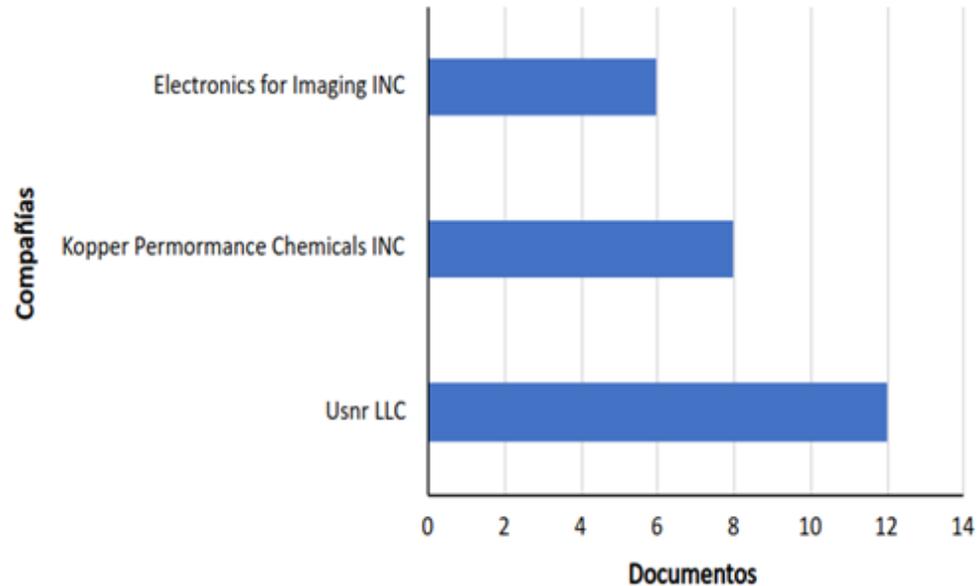


Figura 3. Principales solicitantes de patentes referentes al secado en hornos de madera. Fuente: Base de datos *The Lens*®. Elaboración propia del autor, 2023

La Figura 4, muestra que la tecnología más relevante en estos últimos años referente al secado de madera sigue siendo la convencional con 71 documentos de propiedad intelectual, seguido por el uso de equipos microondas y de vacío, con 13 y 11 solicitudes respectivamente. Finalmente, los desarrollos de hornos deshumidificadores, solares y supercríticos presentan el menor número de patentes.

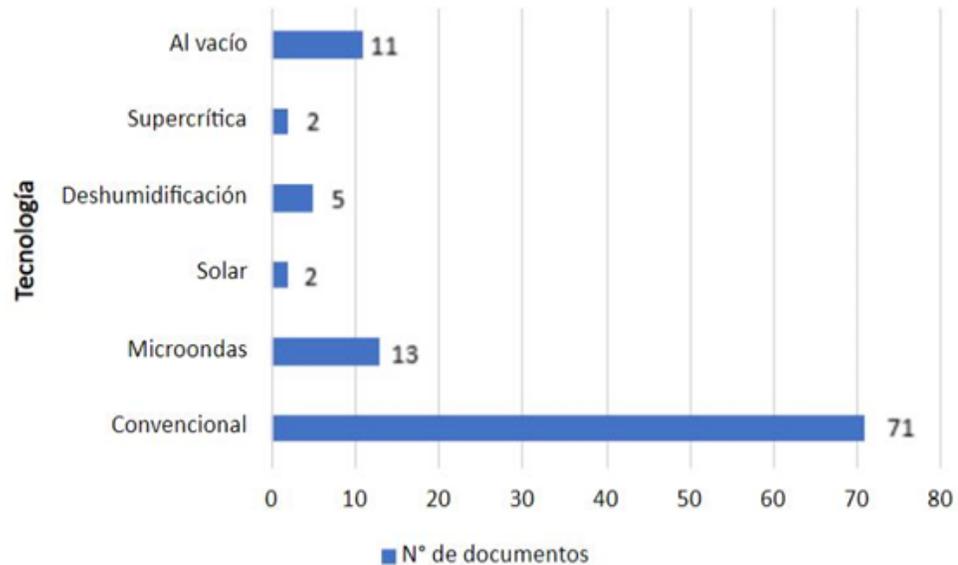


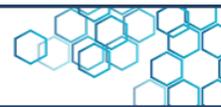
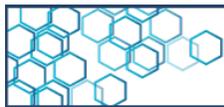
Figura 4. Tecnologías desarrolladas para el secado de especies maderables. Fuente: Base de datos *The Lens*®. Elaboración propia del autor, 2023.

3.2.1 Desarrollo de tecnologías – Patentes

A continuación, se señala una breve descripción de tres (3) tecnologías utilizadas para el secado de la madera, a saber:

3.2.1.1 Patente N° US11384980B2 / utilizando microondas

Un método para reducir el contenido de humedad aplicando radiación microondas en combinación con ondas de radio frecuencia, es descrito



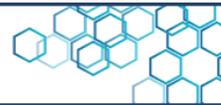
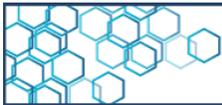
por Triglia [14], donde el material es expuesto principalmente a un ciclo de calor y opcionalmente a intercalaciones de ciclos de calentamiento y enfriamiento; usando un equipo que incluye a un transportador de alimentación vertical. La fase de calentamiento consiste en la irradiación de la muestra de madera por un periodo de tiempo con suficiente intensidad para vaporizar la humedad a través de todo el grosor, sin la destrucción de las células de la madera.

3.2.1.2 Patente N° WO 2018/048467A1 / Horno deshumidificador

Lewis [15], desarrollaron un horno deshumidificador que logra alcanzar temperaturas mucho mayores que las tradicionalmente obtenidas por este tipo de equipos (115 - 127) °C, las cuales solo habían podido ser alcanzadas en los hornos convencionales. La invención hace uso de refrigerantes, los cuales no habían sido previamente usados en el secado mediante deshumidificación. A fin de hacer uso de refrigerantes de alta temperatura, este procedimiento emplea variables de rangos de control para el secado del aire que es usado como el medio secante, y además reestructura el despliegue de los componentes del circuito de refrigeración que participa en el intercambio de calor y humedad del horno.

3.2.1.3 Patente N° US2018/0071944A1 / Horno convencional

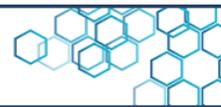
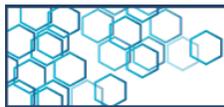
Curran *et al.* [16], proponen un nuevo método para el secado y tratamiento previo de la madera, que incluyen madera suave y madera



dura. Este desarrollo, comprende un tratamiento inicial de la madera con una solución base para luego ser secada al aire libre. La solución base se compone de solventes orgánicos miscibles en agua, con el objetivo de intercambiar agua con la estructura interna de la madera, previo al secado reducir el contenido de humedad. Opcionalmente, la madera puede ser sometida a la aplicación de preservativos con el objetivo de inhibir la degradación. Los aditivos seleccionados pueden contribuir con la protección UV, protección microbiana y fungal de la madera, logrando un mejor acabado y calidad de la misma. Finalmente, la madera es introducida a un horno convencional a 110 °C hasta obtener el gradiente de humedad requerido.

4. Conclusiones

El secado de la madera mediante el uso de hornos disminuye considerablemente el contenido de agua en las especies tratadas, garantizando su resistencia a la descomposición, propiedades mecánicas y dimensiones. Por lo general, el contenido de agua óptimo para la madera con fines industriales se encuentra alrededor de 12 %. De las tecnologías mencionadas, el secado de hornos convencional sigue siendo la tecnología más empleada en la industria maderera. Posiblemente, el ahorro de energía mediante la reutilización de residuos como combustible, las altas temperaturas alcanzadas y el establecimiento de un cronograma de secado eficiente, hacen de este desarrollo tecnológico el más atractivo para el mercado. Aunque el resto de las tecnologías mencionadas, aún están en etapa de optimización y desarrollo, la perspectiva a futuro es prometedora.



5. Referencias

[1] Dawson BSW, Pearson H, Kimberley MO, Davy B, Dickson AR. Effect of supercritical CO₂ treatment and kiln drying on collapse in *Eucalyptus nitens* wood. *Eur J Wood Wood Prod.* 2020;78(2):209-17. <http://dx.doi.org/10.1007/s00107-020-01500-5>.

[2] Moscoso J, Gutiérrez C. Técnicas de Secado de la Madera. Lima: Centro de Innovación Tecnológico de la Madera (CITEMadera). 2016. https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/571600/03_T%C3%A9cnicas_de_secado.pdf.

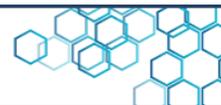
[3] Simpson W. Drying wood: a review - Part I, *Drying Technology: An International Journal.* 1983. (2): 235-264. <http://dx.doi.org/10.1080/07373938308959827>.

[4] Thybring EE, Fredriksson M. Wood modification as a tool to understand moisture in wood. *Forests.* 2021;12(3):372. <http://dx.doi.org/10.3390/f12030372>.

[5] Jankowsky I, Santos R. Drying behavior and permeability of *Eucalyptus grandis* lumber. *Maderas. Ciencia y Tecnología,* 2005(7): 17-21. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2005000100002>.

[6] Franick RA, Gallagher S, Kroese H. Dewatering green sapwood using carbon dioxide cycled between supercritical fluid and gas phase. *J Supercrit Fluids.* 2014; 89:113-8. <http://dx.doi.org/10.1016/j.supflu.2014.02.019>.

[7] Loiola P, Marchesan R, França M, Juizo C, Pereira M, y Klitzke R. Yield of a portable sawmill and wood drying of *hovenia dulcis* in conventional kiln. *FLORESTA.* 2018. 49:079. <https://dx.doi.org/10.5380/rf.v49i1.57053>.



[8] Phonetip K, Brodie G, Ozarska B, Belleville B. Drying timber in a solar kiln using an intermittent drying schedule of conventional laboratory kiln, *Drying Technology*.
<https://doi.org/10.1080/07373937.2018.1496337>.

[9] Alikhani N, Li L, Wang J, Dewar D, y Tajvidi M. Exploration of membrane-based dehumidification system to improve the energy efficiency of kiln drying processes: Part I factors that affect moisture removal efficiency. *Wood and fiber science: journal of the Society of Wood Science and Technology*. 2020. 313-325.
<https://wfs.swst.org/index.php/wfs/article/view/2960>.

[10] He Z, Qian J, Qu L, Wang Z, Yi S. Simulation of moisture transfer during wood vacuum drying. *Results Phys*. 2019;12:1299-303.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.rinp.2019.01.017>.

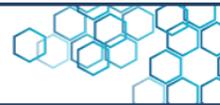
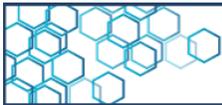
[11] Lyon S, Bowe S, Wiemann M. Understanding Vacuum Drying Technologies for Commercial Lumber. *Technologies for Commercial Lumber. General Technical Report*. 2021.
https://www.fpl.fs.usda.gov/documnts/fplgtr/fpl_gtr287.pdf.

[12] Ananias R, Sepúlveda V, Pérez N, Torres J, Salvo L, Castillo D, y Salinas C. Radio frequency vacuum drying of Eucalyptus nitens juvenile wood. *BioResources*. 2020. (15): 4886-4897.
<http://dx.doi.org/10.15376/biores.15.3.4886-4897>.

[13] Froget L, Benítez P, Valero S, León W, Gutiérrez I. Secado de Pinus caribaea var. hondurensis utilizando radiación de microondas. *Rev Tecnol Marcha*. 2022. <http://dx.doi.org/10.18845/tm.v35i2.5435>.

[14] Triglia J. System and Method for reducing Moisture in Materials or plants using microwave radiation and RF Energy. US Patent. 11384980B2, 2022.

[15] Lewis D. High Temperature Dehumidification Drying System. World Patent. 2018/048467A1, 2018.



[16] Curran S, Liao K, Alley N, Haldar A y Maharjan S. Wood Drying and Preservation Method. US Patent 2018/0071944A1, 2018.

