

DISEÑO FACTORIAL EN SECADO INDUSTRIAL A ALTA TEMPERATURA, DE PINO RADIATA

Roberto Melo H. (*)

RESUMEN

En este trabajo se presenta una aplicación de la técnica del diseño de experiencias factorial, para determinar condiciones favorables de secado de madera aserrada de pino radiata a alta temperatura en una empresa de la Octava región.

El diseño se efectúa en forma independiente para tres parámetros relevantes del proceso de secado, a saber, costo por unidad de masa de agua evaporada y por unidad de volumen de madera, capacidad productiva y desuniformidad de la humedad final.

Concluye el trabajo con una interpretación y discusión de los resultados obtenidos, considerando en forma conjunta los parámetros analizados.

ABSTRACT

This article presents an application of the factorial experiment design, in order to determine the best conditions for drying radiata pine timber at hight temperature in a regional factory.

The design is carried out independently for three important drying parameters: cost by unity of evaporated water mass and by unity of wood volume; productive capacity and disuniformity of the final humidity.

Finnally, this work offers an interpretation and discussion of the main results, considering all the different studied parameters.

(*) Ingeniero Civil Mecánico e Industrial, División Industrias de la Subsede Regional, Instituto Forestal. Barros Arana 121, Piso 3. Concepción - Chile.

INTRODUCCION

En la Octava Región y en general en Chile, se ha producido un sostenido aumento en la industrialización de la madera de Pino Radiata, generándose una alta competitividad en su comercialización. En consecuencia, un adecuado secado de esta madera ofrece interesantes expectativas de ingreso a nuevos mercados internos y externos, de mayor exigencia en cuanto a la calidad de la misma, siendo de importancia contar con un estudio detallado sobre las mejores condiciones de secado, a fin de obtener madera seca de calidad. Esto cobra especial relevancia tratándose de madera elaborada.

Los resultados obtenidos a nivel industrial no han sido exitosos, debido a los defectos que se desarrollan en la madera al secarla a alta temperatura. Además, la madera secada en estas condiciones pierde el baño de sales protectoras. De modo que, al acopiarla en patio o durante el período de embarque, las piezas que poseen una humedad superior al 20% generalmente son atacadas por hongos y pueden ser rechazadas por los compradores; debido a ésto, uno de los efectos más serios de la madera que se seca, es la desuniformidad de la humedad final.

Se hace necesario entonces, determinar las mejores condiciones de secado posibles para las instalaciones existentes, con el objeto de minimizar el defecto descrito.

Sin embargo, no sólo este defecto es determinante en la decisión del programa de secado respectivo, debiendo considerarse el costo y la capacidad productiva de las cámaras. Es decir, se deben establecer programas de secado que optimicen el proceso.

DESARROLLO

La optimización en el presente trabajo se efectúa en base a tres parámetros, a saber, costo por unidad de masa de agua evaporada y por unidad de volumen de madera, capacidad productiva y desuniformidad de la humedad final.

Para estos tres casos, se realiza en forma independiente un diseño de experiencias del tipo 2^4 , confundiendo en dos bloques la interacción de tercer orden. En lo que respecta a los dos primeros, se considera una sola réplica, y como variables dependientes, el costo de secado y la capacidad productiva respectivamente. Para la desuniformidad de humedades se emplean ocho réplicas y la respuesta corresponde a la desviación estándar promedio de humedades.

Los factores independientes que intervienen en los tres diseños experimentales son: temperatura de bulbo seco (T), diferencia sicrométrica (D), espesor de la madera (G) y tratamiento de vaporizado intermedio (V).

El diseño efectuado permite trabajar en forma simultánea con dos cámaras de secado. Cada ensayo se replica ocho veces para la desuniformidad de humedades, puesto que se cargan ocho pilas de madera en las cámaras de secado y cada uno de ellas corresponde a una réplica diferente. De modo que se tiene un total de dieciseis ensayos, ocho en cada bloque, combinando los tratamientos en forma aleatoria dentro de ambos.

El modelo experimental en cuestión, utilizado para los tres diseños experimentales que se efectúan, es el siguiente:

$$\begin{aligned}
 X_{ijkln} = & u + T_i^{(A)} + D_j^{(A)} + G_k^{(F)} + V_l^{(F)} + (TD)_{ij}^{(A)} \\
 & + (TG)_{ik}^{(A)} + (TV)_{il}^{(A)} + (DG)_{jk}^{(A)} + (DV)_{jl}^{(A)} \\
 & + (GV)_{kl}^{(F)} + (TDG)_{ijk}^{(A)} + (TDV)_{ijk}^{(A)} \\
 & + (TGV)_{ikl}^{(A)} + (DGV)_{jkl}^{(A)} + (TDGV)_{ijkl}^{(A)} \\
 & + \in n(ijkl)^{(A)}
 \end{aligned}$$

donde : i	= 1,2 (Factor T: factor aleatorio con dos niveles)
j	= 1,2 (Factor D: factor aleatorio con dos niveles)
k	= 1,2 (Factor G: factor fijo con dos niveles)
l	= 1,2 (factor V: factor fijo con dos niveles)
n	= 1,8 (réplicas, caso general)
ϵ	= error experimental
X_{ijkln}	= variable respuesta
F	= fijo
A	= aleatorio

Las hipótesis nulas (H_0) a docimar son:

H_0 : T_i	= 0	No hay efecto de la temperatura de bulbo seco en la respuesta
H_0 : D_j	= 0	No hay efecto de la diferencia sicrométrica en la respuesta
H_0 : G_k	= 0	No hay efecto del espesor de la madera en la respuesta
H_0 : V_l	= 0	No hay efecto del tratamiento de vaporizado intermedio en la respuesta
H_0 : $(TD)_{ij}$	= 0	No hay efecto de la interacción sobre la respuesta
.	.	.
.	.	.
H_0 : $(DGV)_{ikl}$	= 0	No hay efecto de la interacción sobre la respuesta

El análisis experimental se efectúa mediante un programa computacional considerando dos niveles de significación de 5% y 1%.

El control de humedad en el diseño que considera como variable respuesta la desviación estándar de humedad, se realiza en dos puntos a lo largo de la pieza, obteniéndose un valor representativo de su humedad real. Esta metodología se establece en un análisis estadístico previo.

Para la determinación de los costos de secado se realiza un balance energético de las cámaras de secado y un balance térmico de la unidad generadora de agua caliente. El costo se obtiene por unidad de masa de agua evaporada y por unidad de volumen de madera, secada a igual humedad final promedio, con el objeto de independizarse de la humedad inicial de la madera y de su grosor.

La humedad inicial tanto de las piezas de madera como de las pilas que se cargan en las cámaras de secado, se obtiene mediante un muestreo aleatorio simple que se efectúa separadamente para cada caso.

En el estudio de métodos que se realiza para determinar la capacidad productiva de los secadores, se construye un diagrama de actividades múltiples. En base a éste, se obtienen los

factores de operación y carga de trabajo para el operario y equipos que intervienen. Para los secadores, el factor de operación corresponde a la proyección de valores mensuales (obtenidos de estadísticas) a un período de un año.

La clasificación del trabajo efectuado por operarios, equipos y máquinas, se realiza considerando trabajo directo (T.D.), trabajo indirecto (T.I.) y descanso (D).

En base al factor de operación de las cámaras, la eficiencia, rendimiento, factor de utilización y productividad estándar de carga, se determina la capacidad productiva de los secadores para cada ensayo de secado.

Posteriormente para el análisis conjunto del efecto de los tres parámetros de secado, se utiliza en test de comparaciones múltiples de Duncan, llegándose a obtener de esta manera, las condiciones más adecuadas de secado.

RESULTADOS

En el diseño factorial para costos de secado, se determina que sólo el efecto principal espesor de la madera (G) es significativo, o bien que no existe evidencia suficiente para establecer que los factores restantes y sus interacciones sean significativos.

En lo que respecta al estudio de métodos, se establece que los factores de operación son bastante altos al proyectarlos en un período de un año, determinándose un valor medio (promedio ponderado) de 87,42% para las tres cámaras en conjunto.

Las eficiencias obtenidas para el cálculo de las capacidades productivas, fluctúan alrededor del 65%, es decir, son prácticamente iguales para todos los ensayos realizados.

Del diseño de experiencias en el cual se considera la productividad de los secadores como respuesta, se establece que solamente el espesor de la madera (G) es significativo y que no se dispone de información suficiente para no considerar significativamente los demás factores y sus interacciones.

Para la desviación de humedades se detectan las interacciones significativas. Ellas son temperatura y diferencia sicrométrica (TD) y temperatura y espesor de las piezas (TG). La tercera interacción de importancia corresponde a diferencia sicrométrica y espesor de la madera (DG) y es altamente significativa.

Sin embargo, como en el análisis de costo y productividad se determinan que sólo existen diferencias para los dos espesores de piezas utilizados, no se consideran interacciones que involucren dicho espesor. Luego, se estudia nada más que la interacción temperatura-diferencia sicrométrica (TD).

Posteriormente, empleando el test de Duncan de comparaciones múltiples, se determina que combinaciones de niveles de temperatura y diferencia sicrométrica son estadísticamente distintos. El análisis se efectúa en forma independiente para los dos grosores de madera. En base a esta información se establecen los programas de secado que minimizan la desuniformidad del secado, comparando las combinaciones que difieren entre sí. Los programas escogidos para 25 y 50 mm son los siguientes:

Espesor (mm)	Temp. bulbo seco (°C)	Temp. bulbo húmedo (°C)	Tiempo (h)
25	100	60	11
50	100	75	14

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Debido al grado de incertidumbre que introduce una proyección del factor de operación, de los secadores, se recomienda realizar mediciones que consideren un mayor período de tiempo.

Los valores de eficiencia determinados no son altos, ya que en general no se efectúa el carguío de las cámaras aprovechando en su totalidad la longitud de los secadores. Normalmente se dejan espacios libres entre pilas de madera y entre la carga y puertas y/o pared posterior.

Tanto para el análisis de costo como de productividad, dada su semejanza, se recomienda efectuar un estudio de similares características pero incrementando el número de réplicas, para detectar con mayor precisión si los factores restantes (temperatura, diferencia sicrométrica, vaporizado intermedio), efectivamente no influyen en la respuesta.

Los factores controlables que no se consideren en las experiencias y que están relacionados con la productividad de las cámaras, tales como el espesor de los separadores y ancho de las pilas, deben disponerse de manera de aprovechar el máximo la capacidad de los secadores.

El espesor de la madera es significativo tanto para el costo de secado como para la productividad de los secadores, de manera que es necesario establecer condiciones de secado para los dos espesores de madera ensayados.

Para cada espesor de las piezas, la interacción temperatura-diferencia sicrométrica (TD) determina el programa de secado que se requiere.

Los resultados obtenidos de los diseños experimentales, para costos, capacidades de producción y uniformidad de humedades, sólo son válidos para el rango considerado en los factores aleatorios (temperatura y diferencia sicrométrica) y para los niveles empleados en los factores fijos (espesor de la madera y vaporizado intermedio).

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. KOLLMANN, F. 1959. Tecnología de la madera y sus aplicaciones. Madrid, Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias y el Servicio de la madera. 675 p.
 2. VILLIERE, A. 1966. Séchage des bois. Paris, Dunod. 100 p.
 3. MELO, R.; ORREGO, P. y PAVON, M. 1984. Optimización del secado industrial de madera de Pino Radiata. Tesis, Universidad de Concepción, Fac. de Ingeniería. Concepción, 385 p.
 4. REYES, A. 1984. Estudio de la caldera N°3 de la planta térmica de INFORSA S.A. Tesis, Univ. de Concepción. Fac. de Ingeniería. Concepción. 100 p.
 5. ALTAMIRANO, A. 1983. Programa de cálculo de caldera de tubos de fuego. Tesis, Univ. de Concepción, Fac. de Ingeniería. Concepción. 110 p.
 6. CAICEO, F. 1968. Diseño experimental en metalurgia extractiva. Tesis Univ. de Concepción, Fac. de Ingeniería. Concepción. 80 p.
 7. OFICINA INTERNACIONAL DEL TRABAJO. 1973. Introducción al estudio del trabajo. 2º edición. Ginebra. pp. 5 - 115.
 8. GUTIERREZ, M. 1985. Secado a alta temperatura y su influencia en la madera. Documento técnico, Chile Forestal N° 100, Stgo. 8 p.
 9. DIRECCION DE INVESTIGACION TECNOLOGICA Y ASISTENCIA TECNICA. 1983. Norma ASME PTC - 41 para unidades generadoras de vapor. Fac. de Ingeniería. Concepción. Concepción. 100 p.
 10. RETAMAL, C. Y SALAZAR, J. 1977. Introducción al diseño y análisis de experimentos. Tesis, Univ. de Concepción, Fac. de Ingeniería. Concepción. 60 p.
 11. KRICH, E. 1973. Ingeniería de métodos. Ciudad de México. México, Limusa. 300 p.
 12. MONTGOMERY, D. 1976. Design and analysis of experiments. New York, John Wiley & Sons. 415 p.
 13. HINES, W. and MONTGOMERY, D. 1980. Probability and statistics in engineering and management science. New York, John Wiley & Sons. 430. p.
-