

UNIVERSIDAD DEL BIO-BIO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPTO DE ING.EN MADERAS



Tesis Presentada para la obtención del grado de  
Magister en Ciencia y Tecnología de la Madera  
por

**Mara Alvear Alegría**

**MODELACION DE LA CINETICA DEL SECADO CONVENCIONAL DE LA  
MADERA: APLICACION A DATOS INDUSTRIALES DE UN MODELO  
FENOMENOLOGICO PARA COIGÜE Y EXPLORACION DE UN MODELO  
BIDIMENSIONAL**

Presentada en la ciudad de Concepción, de la República de Chile, en Julio del 2003,  
ante la comisión de examen integrada por:

Directores de Tesis:	<b>Dr. Carlos Salinas</b>	Profesor Asistente, Facultad de Ingeniería, Universidad del Bío-Bío
	<b>Dr. Rubén A. Ananías</b>	Profesor Asociado, Facultad de Ingeniería, Universidad del Bío-Bío
Examinadores:	<b>Dr. Rodolfo Neumann</b>	Profesor Titular, Facultad de Ingeniería Universidad de Concepción
	<b>Dr. Nelson Moraga</b>	Profesor Titular, Facultad de Ingeniería Universidad de Santiago
Presidente:	<b>Dr. Mario Ramos</b>	Profesor Asistente, Facultad de Ingeniería, Universidad del Bío-Bío.

## RESUMEN

El presente trabajo dice relación con la modelación numérica de la cinética del secado de la madera basada en modelos fenomenológicos y de transporte bidimensional de calor y masa. Con los primeros se describe la variación de los parámetros característicos del secado en el tiempo, en tanto que los segundos, además de la distribución temporal de los citados parámetros, incorporan las variables independientes de un espacio bidimensional. La variación de contenido de humedad experimental y modelada es presentada, según resultados obtenidos mediante la aplicación de la modelación fenomenológica para una carga de secado convencional de la especie coigüe *Nothofagus dombeyi*, previa determinación de coeficiente global de secado y coeficiente convectivo de transferencia de masa basados en datos obtenidos en secado industrial. La modelación bidimensional es abordada según el concepto de potencial hídrico de lo que resulta un sistema de ecuaciones diferenciales parciales no lineales de segundo orden, resuelto según el Método de Volúmenes Finitos, cuyos resultados muestran, además de las curvas características del secado, distribuciones espaciales de temperatura y humedad, resultado del análisis de convergencia de las variables utilizando diferentes mallados. En ambos modelos los resultados arrojan una predicción satisfactoria con error medio entre 1.06 y 3.5% para temperatura y humedad respectivamente en el fenomenológico en tanto, la predicción 2-D presenta error medio de 0.88% entre convergencia de mallas 20x20 y 40x40, así como 5.2% entre datos experimentales y malla 20x20. Se concluye que los modelos fenomenológicos son simples en comparación con los bidimensionales, de bajo costo computacional y se visualizan como herramienta de auxilio a la conducción del secado. Por otro lado, el modelo bidimensional, es más complejo, requiere mayor esfuerzo computacional, predice aceptablemente la cinética del secado y nos ofrece mayores y mejores datos para el análisis.

## ABSTRACT

This work presents a numerical modeling of kinetic drying of wood, based on a phenomenological model and a two-dimensional of heat and mass transfer model. The time variation of the characteristic parameters of the drying are described from the phenomenological model. The unsteady distribution of temperature and humidity incorporate the independent variables to the two-dimensional space. The variation of experimental and modeled humidity content is presented, according to results obtained by means of application of the phenomenological model for conventional drying of the coigüe species, *Nothofagus dombeyi*, previous determination of global drying and convective mass transfer coefficients based on collected data at industrial scale. The two-dimensional modeling is supported by the water potential concept, using a nonlinear system of second order partial differential equations, solved according to the Finite Volumes Method. The results obtained include curves of the drying, spatial temperature and moisture distributions. The conclusion is that the phenomenological model is easy to apply and it has a low cost from the computational point of view. Furthermore, the model proposed aids to the prediction of the drying process. By the other hand, the two-dimensional pattern, is more complex, it requires bigger computational effort, it predicts the kinetics of drying and offers greater and better data to the final analysis.

## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCION .....	1
OBJETIVOS.....	3
➤ Objetivo general.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
➤ Objetivos específicos.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
PARTE I. Modelación fenomenológica	
1.1 FUNDAMENTACION TEORICA.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
1.1.1 Modelo matemático.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
1.1.2 Modelación numérica.....	6
1.2 METODOLOGIA.....	8
1.2.1 Datos industriales .....	8
1.2.2 Determinación del coeficiente global de transferencia de masa ( $K_x$ ). .....	8
1.2.2.1 Basado en datos de secado a escala industrial ( $K_{xopt}$ ).....	8
1.2.2.2 Obtenido por correlación ( $K_{xcor}$ ):.....	9
1.2.3 Modelación del secado.....	9
1.3 RESULTADOS.....	10
PARTE II: Modelación bidimensional	
2.1 FUNDAMENTACION TEORICA.....	<b>¡Error! Marcador no definido.4</b>
2.2 MODELACION BIDIMENSIONAL : Modelo de Luikov.....	<b>¡Error! Marcador no definido.6</b>
2.2.1 Modelo Matemático.....	16
2.2.2 Modelación Numérica .....	17
2.3. METODOLOGIA.....	21
2.3.1 Implementación del modelo .....	21
2.3.2 Validación del método numérico y aplicaciones.....	21
2.3.3 Aplicaciones .....	<b>¡Error! Marcador no definido.1</b>
2.3.3.1 Difusión Unidimensional .....	<b>¡Error! Marcador no definido.1</b>

• Planteamiento del problema .....	¡Error! Marcador no definido.1
• Resultados y discusión .....	¡Error! Marcador no definido.3
2.3.3.2 Difusión Bidimensional Isotrópica.....	¡Error! Marcador no definido.4
• Planteamiento del problema .....	¡Error! Marcador no definido.4
• Resultados y discusión .....	¡Error! Marcador no definido.5
2.3.3.3 Difusión Bidimensional Ortotrópica .....	¡Error! Marcador no definido.8
• Planteamiento del problema .....	¡Error! Marcador no definido.8
• Resultados y discusión .....	¡Error! Marcador no definido.9
CONCLUSIONES.....	33
RECOMENDACIONES.....	34
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	35
SIMBOLOS.....	38
ANEXO “A” Modelación fenomenologica	
A.1: Cálculo del coeficiente convectivo de transferencia de calor (h)	
A.2: Cálculo del calor latente de vaporización del agua en el aire ( $\Delta h_0$ )	
A.3: Cálculo del flujo másico (G)	
A.4: Determinación del No. Reynold (Re)	
Figuras A.1 – 3: Análisis de regresión	
ANEXOS “B” Modelación bidimensional	
B.1: Gravedad específica ( $G_m$ )	
B.2: Potencial inicial ( $\psi_i$ )	
B.3: Potencial de equilibrio ( $\psi_\infty$ )	
B.4. Coeficiente convectivo de transferencia de masa ( $h_m$ )	
Figuras B.1 – 3: Datos experimentales (Cloutier et al 1992)	
ANEXO “C” Publicaciones	