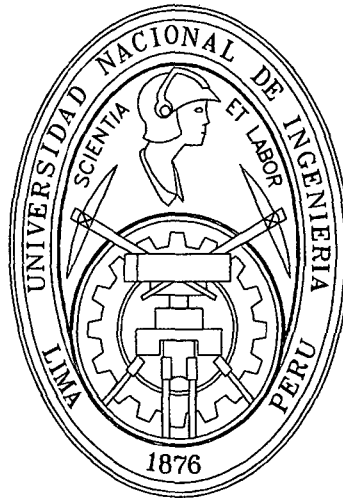


# UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA



## FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

**“DISEÑO DE UN ALGORITMO DE CONTROL NEURO  
DIFUSO APLICADO A UN SECADOR DE MADERA DE  
5000 PT/BATCH”**

## TESIS PARA TÍTULO PROFESIONAL

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:  
INGENIERO MECATRONICO**

**SIMEON QUINTIN VEGA CESPEDES**

**PROMOCIÓN 2008-I**

**LIMA-PERÚ**

**2010**

**Digitalizado por:**

**Consortio Digital del  
Conocimiento MebLatam,  
Hemisferio y Dalse**

### **Dedicatoria**

Para mi madre Faustina por creer siempre en mí y que siendo una mujer tan sencilla me enseñó lo necesario para mi formación profesional así como personal.

Para mi padre Antonio que con su forma de ser me forjó el deseo de superarme cada día.

Para mis sobrinos Diego, Rosalinda, Yamile, Mariana y Gianella que, siendo tan pequeños, siempre encontraron la forma de alegrarme en momentos difíciles.

Para todos mis hermanos y amigos que me brindaron su apoyo incondicional cuando lo necesitaba.

Para esa persona muy especial y para quienes vendrán por ser ese aliciente que necesitaba para seguir adelante y nunca rendirme.

Muchas gracias a todos ustedes de todo corazón.

## INDICE

PRÓLOGO	01
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	04
1.1 ANTECEDENTES	05
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	09
1.3. JUSTIFICACIÓN	10
1.4 OBJETIVOS	14
1.4.1. Objetivos Generales	14
1.4.2. Objetivos Específicos	14
CAPÍTULO 2: CONCEPTOS GENERALES RELACIONADOS A LA MADERA	15
2.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS	15
2.1.1. Humedad de la Madera	15
2.1.2. Contenido de Humedad de Equilibrio	20
2.1.3. Gradiente de Secado de Madera	21
2.1.4. Curvas de la madera	21
2.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE SECADO	23
2.3 CONSIDERACIONES PARA EL SECADO	26
2.3.1. Protección contra Formación de Grietas, Rajaduras y Deformaciones	26

2.3.2.	Apilamiento de la Madera Dentro del Secador	27
2.3.3.	Selección de Muestras	29
2.3.4.	Horarios de Secado	30
2.3.5.	Verificación de la Calidad de Secado	30
<b>CAPÍTULO 3: DESCRIPCIÓN DE EQUIPOS DE SECADO DE</b>		
	<b>MADERA CONVENCIONAL</b>	<b>33</b>
3.1	DESCRIPCION DEL SISTEMA DE CALEFACCION	34
3.2	DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE HUMIDIFICACIÓN	35
3.3	DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE VENTILACIÓN	36
3.4	DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL	39
	3.4.1. Controladores	39
	3.4.2. Interfaces	40
	3.4.3. Sensores	40
<b>CAPÍTULO 4: MODELAMIENTO MATEMATICO DE LA PLANTA</b>		<b>41</b>
4.1	CONCEPTOS GENERALES DE TERMODINAMICA Y PSICROMETRÍA	41
	4.1.1. Conceptos Generales de Termodinámica	41
	4.1.2. Conceptos Generales de Psicrometría	47
4.2	CONCEPTOS GENERALES DE INGENIERÍA DE CONTROL	51
	4.2.1. Modelo Matemático	51
	4.2.2. Controladores Automáticos	53
	4.2.3. Determinación del Comportamiento Dinámico del Sistema	55

4.3	MODELAMIENTO MATEMÁTICO DE VARIABLES TERMODINÁMICAS Y PSICROMÉTRICAS RELACIONADAS AL PROCESO DE SECADO	56
4.3.1.	Consideraciones y Restricciones para el Modelo Matemático	57
4.3.2.	Modelamiento Matemático de la Temperatura del Aire	62
4.3.3.	Modelamiento Matemático de la Humedad Específica del Aire	67
4.3.4.	Modelamiento Matemático de la Presión de Vapor Saturado del Aire Húmedo	69
4.3.5.	Modelamiento Matemático de la Temperatura de la Madera	72
4.3.6.	Modelamiento Matemático del Flujo Másico de Pérdida de Agua de la Madera	73
4.3.7.	Modelamiento Matemático del Flujo Másico de Ganancia de Agua de la Madera por Aire Saturado	75
4.3.8.	Modelamiento Matemático de la Entalpía del Agua en sus Diferentes Fases	76
4.3.9.	Modelamiento Matemático de los Flujos Másicos de Entrada a la Cámara de Secado	78
4.4	MODELAMIENTO MATEMÁTICO DE LA CINÉTICA DE SECADO DE LA MADERA ROBLE	78
4.4.1.	Obtención de Datos para la Cinética de Secado	79
4.4.2.	Planteamiento del Modelo Matemático para el Roble	83
4.5.	ELABORACIÓN DEL PROGRAMA PARA LA SIMULACIÓN	92
	CAPÍTULO 5: DISEÑO DEL ALGORITMO DE CONTROL NEURO-DIFUSO	98

5.1.	FUNDAMENTOS DE LAS REDES NEURONALES	98
5.1.1.	Neurona Perceptrón	100
5.1.2.	Limitación de la Neurona Perceptrón	101
5.1.3.	Perceptrón multicapa	102
5.2.	FUNDAMENTOS DE LA LÓGICA DIFUSA	104
5.2.1.	Control con Lógica Difusa	104
5.2.2.	Métodos de Inferencia Difusa	107
5.3.	OBTENCIÓN DE DATOS DE LA PLANTA A CONTROLAR	120
5.3.1.	Obtención de Datos de Entrada y Salida Óptimos para el Proceso de Secado	120
5.3.2.	Obtención de Datos para el Diseño del Algoritmo de Control	133
5.4.	DISEÑO DEL ALGORITMO DE CONTROL NEURO DIFUSO PARA EL SECADOR DE MADERA	138
5.4.1.	Ingreso de Datos para Estimación y Validación	143
5.4.2.	Definición de Funciones de Membrecía para las Entradas y del Grado del Método de Takagi Sugeno	144
5.4.3.	Definición Etiquetas y Rangos para las Variables Lingüísticas de las Entradas	145
5.4.4.	Obtención de las Reglas Difusas para el Algoritmo de Control	146
5.4.5.	Obtención del Algoritmo de Control Neuro Difuso	153
	CAPÍTULO 6: RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DEL PROCESO DE SECADO	155
6.1.	PRUEBAS REALIZADAS AL ALGORITMO DE CONTROL NEURO DIFUSO	155

6.1.1. Pruebas de Contenido de Humedad y Condiciones de Equilibrio	156
6.1.2. Discusión de Resultados	161
6.2. VALIDACIÓN DE RESULTADOS	161
CONCLUSIONES	166
BIBLIOGRAFÍA	167
ANEXOS	171

## PRÓLOGO

Por secado de la madera se entiende, en forma general, como el proceso de eliminación del agua en exceso del material recién cortado, para optimizar su posterior procesamiento y transporte para usos específicos, [27].

El avance experimentado por la industria de fabricación de secadores permite disponer de técnicas y tecnologías que han optimizado el rendimiento energético y la capacidad de las cámaras de secado. Por otra parte, la introducción de sistemas y de programas informáticos en el control de los secadores, posibilita la conducción del secado de forma automática con una importante reducción del tiempo destinado a su supervisión. Sin embargo, la variabilidad de comportamientos de secado existente entre las distintas especies de madera, e incluso entre la misma especie, dificulta la aplicación de estos sistemas de trabajo, [6]; es aquí donde juega un rol muy importante el tipo de algoritmo de control empleado.

El presente trabajo trata sobre el diseño de un Algoritmo de Control basado en el Método de Inferencia Difusa de Sugeno aplicado a un Secador de Madera de 5000 PT/batch; dicho algoritmo será diseñado a partir de datos experimentales y será probado mediante la simulación del proceso de secado de Madera Roble, obtenida a



partir de su modelo matemático correspondiente el cual también es parte del presente trabajo.

El Primer Capítulo presenta los antecedentes del presente trabajo, el planteamiento del problema que se busca resolver, la justificación correspondiente para la elección de la solución y los objetivos que se buscan alcanzar.

El Segundo Capítulo presenta de forma resumida las características físicas de la madera, la descripción del proceso físico que sigue cuando se seca, las consideraciones a tener en cuenta al momento de realizar el secado así como verificar si dicho secado ha sido adecuado mediante la identificación de defectos.

El Tercer Capítulo trata sobre todos los elementos que componen un secador de madera tomando como ejemplo los equipos usados en la empresa **CITEMADERA**, la cual se visitó antes de la realización del presente trabajo.

El Cuarto Capítulo se enfoca en el modelamiento matemático de la planta, la cual viene a estar compuesta por la madera roble y las condiciones ambientales dentro del secador, valiéndose del Toolbox de Identificación de Sistemas del Matlab, [16]. Además, se presenta de forma resumida los conceptos necesarios para el modelamiento matemático de la planta así como sus consideraciones y restricciones correspondientes.

El Quinto Capítulo se enfoca en el diseño del algoritmo de control neuro-difuso, razón del presente trabajo, valiéndose de los resultados obtenidos en el anterior capítulo y ayudándose del Toolbox de Lógica Difusa del Matlab, [8]. Además, se presenta de forma resumida conceptos relacionados para el diseño de dicho algoritmo.

El Sexto Capítulo presenta las curvas de optimización obtenidas de la simulación del algoritmo de control aplicado a la planta así como la explicación correspondiente a cada curva para su corroboración.

Además de las Conclusiones y la Bibliografía se presenta un Apéndice con el código de los programas confeccionados en el presente trabajo y las tablas usadas.

# **CAPITULO 1**

## **INTRODUCCIÓN**

En la actualidad, la madera tiene innumerables aplicaciones, tales como la fabricación de sillas, muebles, mesas, vigas de construcción, carretes de cables eléctricos, botes, etc.

A medida que la madera se seca, cambian todas sus características físicas como la resistencia mecánica, volumen, densidad, color, etc, [21]. Estas también son influenciadas por la velocidad con que se realiza el proceso de secado; es decir, y como se explicará más adelante, si el proceso de secado de la madera es excesivamente rápido, aparecen defectos en esta tales como torceduras, agrietamientos, etc, [21]. Además, cabe resaltar que en la actualidad urge producir un gran volumen de materia prima (en este caso, madera seca) para satisfacer la demanda del mercado.

De todo lo anterior, se puede inferir que un adecuado proceso de secado traerá como consecuencia la disminución de defectos presentes al final del proceso y se aumentará la eficiencia productiva.

## 1.1 ANTECEDENTES

Durante años, se han realizado innumerables trabajos relacionados al comportamiento de la madera durante su proceso de secado; sin embargo, para el desarrollo del presente trabajo, se escogieron los siguientes:

**“The Impact of Wood Variability on the Drying Rate at Different Moisture Content Levels”**, [2], presentada por Adin Berberović para optar el grado de Doctor en Ciencias de la Madera en la Universidad Estatal de Oregón, Estados Unidos, el 15 de Julio de 2010 cuyo trabajo tenía como objetivo determinar el impacto de la densidad básica, el contenido de humedad inicial, el porcentaje de duramen, el posición del duramen dentro de la tabla, el número de anillos, la distancia de la médula, el crecimiento del ángulo del anillo, la composición química de los componentes volátiles de la madera, la cubierta de las superficies de las tablas sobre el comportamiento del secado de la tsuga occidental (*Tsuga heterophylla*), [14], [28], [21].

Se desarrollaron las relaciones matemáticas para el efecto de las propiedades de la madera y las características geométricas de la tabla relacionadas a la posición dentro de su tronco para predecir la tasa de secado en cuatro niveles de contenido de humedad así como los tiempos de secado de las tablas individuales.

Al final del trabajo, se concluyó que la densidad básica, el contenido de humedad inicial, porcentaje de duramen y el crecimiento del ángulo del anillo afectan la tasa de secado a 80°C y que el contenido de humedad inicial afecta a dicha tasa a 110°C.

**“Numerical Simulation of Wood Drying”, [1]**, presentada por Adin Berberović para optar el grado de Master en Ciencias de la Madera en la Universidad Estatal de Oregón, Estados Unidos, el 24 de Mayo del año 2007, en donde se desarrolló un modelo matemático y luego numérico para la simulación de una cámara de secado. El modelo incorpora relaciones de transferencia de calor y masa dentro de las pilas de madera así como propiedades termodinámicas de la madera y el aire seco así el cambio de las propiedades del aire a lo largo de la pila y sus efectos en los parámetros de transferencia de masa y calor. Además, los parámetros de entrada para la simulación son la cámara, las propiedades individuales de las tablas y el horario de secado los cuales son definidos por el usuario.

Se obtuvo la función de tasa de secado basándose en resultados experimentales obtenidos de 23 cargas de secado pequeñas sobre un rango de condiciones usadas en industria.

Se validó el modelo, en un inicio, en contraste con datos disponibles en la literatura, donde las variables validadas para ambos casos fueron la temperatura de la tabla, la caída de temperatura a lo largo de las pilas y el contenido de humedad de la pila.

Posteriormente, se validó el modelo para diferentes intervalos de tiempo de simulación para verificar la robustez de dicho modelo.

Al final del trabajo se concluyó que, aunque los resultados del modelo dependían del intervalo de simulación, estos podrían servir como referencia del comportamiento de la madera al usar diversos horarios de secado así como para conocer la influencia de otras variables en el proceso de secado.

**“Modelling of Solar Kilns and the Development of an Optimised Schedule for Drying Hardwood Timber”, [18]**, presentada por M. Nawshadul Haque para optar el grado de PhD en Tecnologías de la Industria Forestal en la Universidad de Sydney, Australia, en el año 2006, el cual buscaba desarrollar un horario de secado para el *Eucalyptus pilularis*, [14], [28], [21], con el fin de minimizar el número de grietas. Para tal fin, se realizó el modelo matemático de todo el proceso de secado valiéndose de las fórmulas propias de termodinámica, transferencia de calor, psicrometría y de la cinética de secado de la madera.

Posteriormente, se codificó dicho modelo, junto con algunos horarios de secado, para realizar las pruebas necesarias que determinaron el horario de secado óptimo, el cual se comparó a su vez con los horarios de secado tradicionales.

Al final del trabajo se concluyó que, aunque existen incertidumbres en la predicción de ciertas variables, el horario de secado confeccionado es adecuado.

**“A New Method of Determining Moisture Gradient in Wood”** presentada por Zhiyong Cai en **“Forest Products Journal”, [30]**, en Estados Unidos,

Agosto del 2008 el cual se estudió diversas técnicas de radiación para medir el gradiente de contenido de humedad de la madera así como la variación de su composición en función de su grosor. Para esto, se hizo pasar un haz de un tipo de radiación determinada (rayos X por ejemplo) en uno de los ejes del tronco de madera.

Además, se estableció una serie de ecuaciones para el modelo matemático de la madera permitiendo así predecir las variables de interés.

Por los resultados obtenidos, se concluyó que dicho método puede ser usado para monitorear el movimiento del contenido de humedad de la madera dentro de una cámara de secado, alternativo a los otros métodos ya existentes.

**“A Sensor to Measure Wood Stress During the Drying Process”, [20],** presentada por O. Allegretti, A. Bagolini, B.Margesin y L.Travan en **“9th International IUFRO Wood Drying Conference”** en Italia, 2005, el cual se presenta el diseño e implementación del prototipo de un nuevo sensor para la medición de tensiones sobre la madera durante el proceso de secado. Además, se realizaron mediciones de las tensiones internas de un determinado tipo de madera aplicando diversos métodos ya existentes para compararlos con los datos obtenidos del sensor para así determinar su eficacia.

Al final de las pruebas se concluyó que, aunque se tiene que seguir con el estudio para cumplir ciertos requisitos de la industria maderera, dicho sensor resulta una alternativa muy útil en la medición de tensiones en la madera y, una vez cumplido dichos requisitos, puede ser usado para el control del proceso de secado de la madera.

## 1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Durante años, las personas han tratado de encontrar la mejor forma controlar el proceso de secado con el fin de obtener mayores volúmenes de producción y disminuir los defectos que pudieran aparecer durante el proceso. Como una alternativa de solución a dicha necesidad, se confeccionaron los denominados **“Horarios de Secado”**, [14], [28], [27], [21], los cuales vienen a ser un conjunto de tablas en las cuales se presentan las condiciones internas que debería de presentar la cámara en función del contenido de humedad de la madera en un determinado instante; sin embargo, dichos horarios son solo de tipo referencial, [27], ya que el control de dicho proceso depende de muchas condiciones, entre ellas las adecuadas dimensiones de la cámara de secado, las condiciones internas de la cámara y, muy en especial, el tipo de madera a secar ya que, incluso, maderas del mismo tipo pueden presentar características diferentes lo cual dificulta aún más el control de este tipo de procesos, [6]. Este problema empeora aún más cuando el proceso de secado se realiza de forma manual ya que depende de la experiencia del operador con la cámara de secado. De lo mencionado, se puede concluir que se debe conocer de antemano el comportamiento del proceso de secado para escoger un tipo de control.



### 1.3 JUSTIFICACIÓN

De lo mencionado en las secciones 1.2 y 1.3, un control adecuado del proceso de secado de madera dará como resultado madera seca de buena calidad en el menor tiempo posible. Además, como se mencionó en el secciones 1.2, para seleccionar (diseñar, para el presente trabajo) el control del proceso, se debe conocer el comportamiento de este. Sin embargo, para el presente trabajo, se escogerá la arquitectura de control de Takagi Sugeno, [13], [8], la cual combina las características de las redes neuronales, [4], [13], [3], [10], y las aplica al campo de la lógica difusa, [4], [13], [3], [8], como tipo de control a diseñar por haberse aplicado, con una precisión aceptable, arquitecturas similares en otros tipos de trabajos realizados para el mismo tipo de procesos como para otros procesos tal y como se presenta a continuación:

**“A Performance Comparison of PID, FLC & MPC Controller: A Comparative Case Study”, [24]**, presentada por Sachin Agrahari para optar el grado de Master de Ingeniería Electrónica, Instrumentación y Control en la Universidad de Thapar, Patiala, India, en Julio del año 2009, en el cual se comparan los desempeños entre un Controlador PID, [15], un Controlador Difuso y un Controlador Predictivo MPC, [16], aplicados al control de una Caldera de Vapor Sobrecalentado. Para realizar dicha comparación, se planteó un modelo matemático que, posteriormente, se implementó en Simulink de Matlab para su simulación correspondiente en conjunto con los controladores ya mencionados obteniéndose los resultados de las tablas 1 y 2, [24]:

Controllers Parameters	PID Controller	Fuzzy Logic Controller	MPC Controller
Peak Time( $t_p$ )sec.	0.705	0.52	0.41
Rise Time( $t_r$ )sec.	0.521	0.32	0.24
Settling Time( $t_s$ )sec.	2.45	1.98	1.21
Maximum Overshoot( $M_p$ )	32%	25.4%	16.4%
Steady State Error( $e_{ss}$ )	1.72	1.12	0.64

**Tabla 1. Resultados de la Simulación teniendo como referencia una entrada de tipo escalón unitario.**

Controllers Parameters	PID controller	Fuzzy Logic Controller	MPC controller
Settling Time( $t_s$ )sec.	1.94	1.12	0.86
Steady state error( $e_{ss}$ )	3.46	2.3	0.521

**Tabla 2. Resultados de la Simulación teniendo como referencia una entrada de tipo rampa unitaria.**

De donde se observa que los controladores de tipo predictivo y de lógica difusa presentan un mejor desempeño que un controlador PID convencional.

“Fuzzy Control of Grain Drying Process”, [9], presentado por Hasmah Mansor, Samsul Bahari Mohd Noor, Raja Mohd Kamil Raja Ahmad, Farah Saleena Taip y Omar Farouq Lutfi en “11th International Conference on Computer, Modelling and Simulation” en el año 2009 en donde se mostró la aplicación de un controlador difuso para el control del proceso de secado de granos estableciendo como entradas al error entre el contenido de humedad

actual de los granos y a la derivada de dicho error y como salida a la tasa de secado de los granos.

Valiéndose de un modelo matemático previo, se realizaron las pruebas, por simulación, de las reglas difusas confeccionadas donde se observó un desempeño aceptable.

**“Artificial Neural Networks for Quality Control of Seam Pucker on Textiles”**, [17], presentada por Li Wei para optar el grado de PhD en la Universidad de Hong Kong, China, en Agosto del año 2008, el cual tenía como objetivo principal el diseño y la implementación de un sistema prototipo para control de calidad de productos textiles en tiempo real valiéndose, para este fin, de las Redes Neuronales de Tipo Kohonen o Auto-Organizadas, [4], [10].

Para la determinación de la estructura de las redes, se emplearon dos métodos:

- Auto Construcción Difusa de Mapas Auto-Organizados(FSCSOM), [17]
- El Sistema de Inferencia Neuro Difuso Adaptativo (ANFIS), [17], [8].

Se comparó el desempeño de cada método empleado valiéndose de un Sistema Prototipo Implementado donde, al final de todo el trabajo, se demostró que ambos sistemas de control proveían una alta precisión, tal y como se muestra en la tabla 3, [17]:

Classifier	Ensemble SOM	CANFIS system
Accuracy (%)	90	93

**Tabla 3. Resultados obtenidos en la comparación de ambos sistemas**

**“Neural Networks for Predicting Fracture Toughness of Individual Wood Samples”**, [26], publicada por Sandhya Samarasinghe, Don Kulasiri y Triston Jamieson en la revista de Ciencias Forestales **“Silva Fennica”**, en el año 2007, el cual tenía como objetivo aplicar las redes neuronales en el modelamiento de la resistencia por fractura, las cargas pico y la extensión de roturas que pueden aparecer sobre espécimen de madera *Pinus radiata* durante el secado conociendo su geometría y propiedades del material para así predecir, de forma más precisa, posibles fallas en vigas de construcción fabricadas a base de dicho tipo de madera, donde dichos modelos fueron validados usando datos experimentales obtenidos mediante la ayuda de una video cámara.

**“Time series techniques for dynamic, real-time control of wood-drying processes”**, [5], publicada por Charles D. Ray, Neelesh Gattani, Enrique del Castillo y Paul Blankenhorn en el **“Forest Products Journal”**, en Octubre del año 2005, en el cual se obtuvo un modelo matemático que tenga como entrada al Contenido de Humedad en Equilibrio y como salida a la Tasa de Remoción de Humedad de la Madera (Flujo Másico de Pérdida de Humedad de la Madera para el presente trabajo) utilizando el Modelo Matemático de Box-Jenkins, [5], [16], para el diseño de un algoritmo de control predictivo GMV, [5], aplicado al secado del Maple y teniendo un Contenido de Humedad Inicial igual al 30% y un Contenido de Humedad Final igual al 15% como rango de análisis; además, se comparó, en simulación, el desempeño del controlador diseñado con los horarios de secado ya mencionados observándose que éste presenta un mejor desempeño para el rango establecido.

## **1.4 OBJETIVOS**

### **1.4.1 Objetivos Generales**

Diseñar un Algoritmo de Control para el proceso de secado de madera, usando lógica difusa y redes neuronales.

### **1.4.2 Objetivos Específicos**

- Encontrar un modelo matemático para el proceso de secado completo del roble.
- Crear un programa para la simulación de todo el proceso de secado.
- Obtener los datos necesarios para el diseño del Algoritmo de Control Neuro Difuso a partir de la simulación.

## CAPITULO 2

### CONCEPTOS GENERALES RELACIONADOS A LA MADERA

#### 2.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

##### 2.1.1 Humedad de la Madera

El árbol en pie contiene un elevado nivel de agua. Algunas especies livianas como la balsa y el mapajo pueden contener hasta 300% ó 400% de contenido de humedad; otras muy pesadas como el quebracho colorado llegan hasta un 50% a 60% como máximo. En la figura 1, [27], se muestra la distribución del agua dentro de las fibras de la madera.

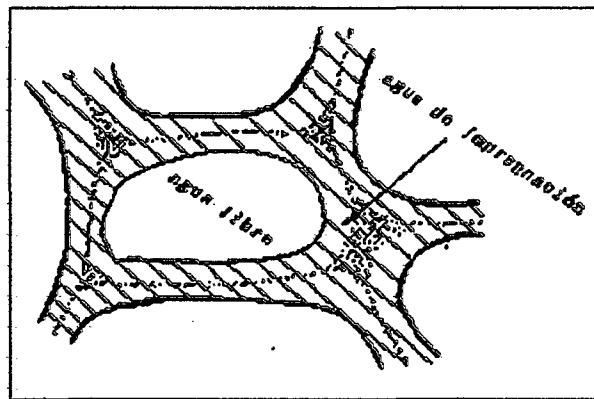


Figura 1. El agua en la madera

El agua en la madera está presente en dos formas: **agua libre o capilar**, que se encuentra en el interior de las cavidades celulares. Es el agua de más fácil extracción. Al eliminarla no se presentan modificaciones apreciables en las propiedades físicas y mecánicas del leño y se llega a un nivel de humedad de

aproximadamente 30% en la madera. A este contenido de humedad se denomina **Punto de Saturación de la Fibras (PSF)**, [1], [2], [18], [30], [27], [21].

El **agua de impregnación** es la que se encuentra adherida a las paredes celulares. Una vez iniciada la eliminación de esta forma de humedad a partir del PSF, se inician las modificaciones de las propiedades físicas y mecánicas de la madera.

En la tabla 4 [27] se muestra la denominación y el uso que se le da a la madera en función de su contenido de humedad.

Denominación del estado de la madera	Nivel de humedad	Lugar de ubicación
Madera verde	de 80 a + 200%	bajo cubierta en el bosque
Madera húmeda	25 a 80 %	recién cortada, en patio de trozas o a la intemperie
Madera poco seca	de 20 a 25%	aire libre
Madera seca al aire	de 15 a 20%	bajo techo
Madera muy seca	de 8 a 15%	interiores
Madera anhidra	0%	en laboratorio

**Tabla. 4 Denominaciones de la Madera**

El nivel de humedad de la madera se calcula como un porcentaje del peso del agua que contiene, respecto al peso del material seco como se observa en la ecuación (1), [1], [2], [18], [30], [19], [6], [14], [27], [21]:

$$CH = 100 \left( \frac{P_h - P_o}{P_o} \right) \quad (1)$$

Dónde:

$P_h$ : Peso Húmedo o Peso Inicial de la Madera.

$P_o$ : Peso Anhidro de la Madera.

$CH$ : Contenido de Humedad de la Madera (%).

Existen varios métodos para determinar el contenido de humedad de la madera, los más comunes son el método gravimétrico o por pesadas y el método eléctrico, [12], [6], [27], [21].

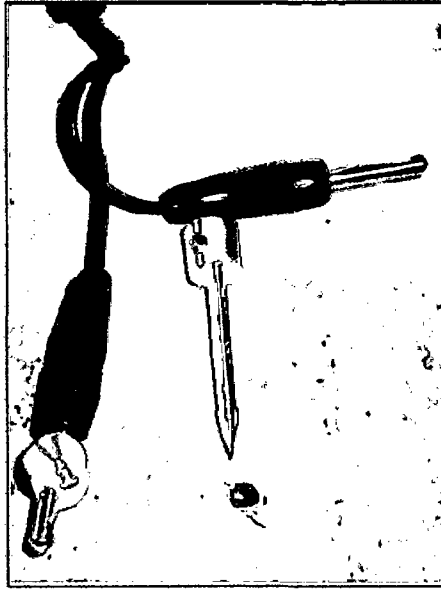
**Método Gravimétrico**, se emplea una balanza con una precisión aproximada de 0,1 g para pesar la muestra (peso húmedo) al momento de su obtención y después se determina el peso anhidro, como se describió en el inciso anterior. Este método es uno de los más exactos y confiables.

**Método Eléctrico**, emplea algunas propiedades eléctricas de la madera. El aparato más empleado es un medidor del contenido de humedad basado en la resistencia eléctrica que ofrece la madera al paso de una corriente continua (de una batería o pila). Las lecturas dependen de la especie de madera, temperatura de la tabla y de la profundidad de penetración de los electrodos. Algunos modelos disponen de una corrección por especie para las maderas más conocidas, y otros, además, tienen corrección por temperatura.

La determinación de la humedad por medio de sondas eléctricas, presenta unos grados de fiabilidad aceptables, cuando se tienen en cuenta una serie de factores que influyen en las mediciones.

En la figura 2 [6] se muestra una sonda de medición usada para determinar el contenido de humedad de la madera.



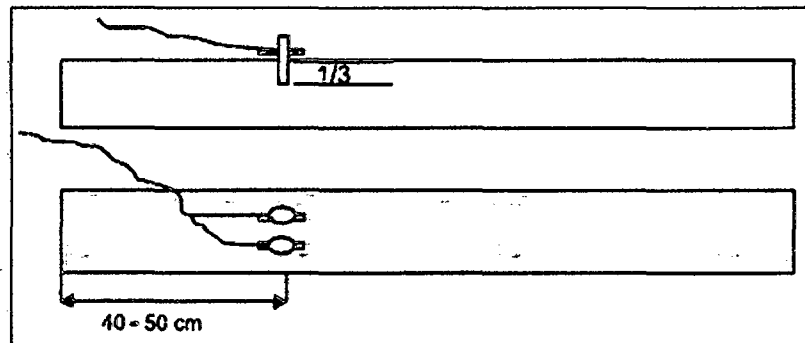


**Figura 2. Sonda de medición**

La fiabilidad de los datos obtenidos por este método es muy alta para intervalos de humedad comprendidos entre el 7 y el 30% (el rango de fiabilidad varía según el tipo de madera), [12], [6], [27], [21]. Con contenidos de humedad superiores los datos deben considerarse como una referencia mucho menos fiable.

La conductividad y las propiedades eléctricas dependen de la especie de madera y de la temperatura a que se encuentre, por lo que es conveniente que el equipo de medición disponga de un sistema de corrección de los valores de humedad obtenidos, en función de estos parámetros.

La figura 3, [6], muestra la forma de cómo colocar las sondas de medición en la madera para obtener datos fiables.



**Figura 3. Ubicación de las sondas eléctricas**

Cabe resaltar, además, que la resistencia eléctrica de la madera está relacionada con el Contenido de Humedad de esta mediante la ecuación (2) aplicada tomando como caso particular al roble, [12], [21]:

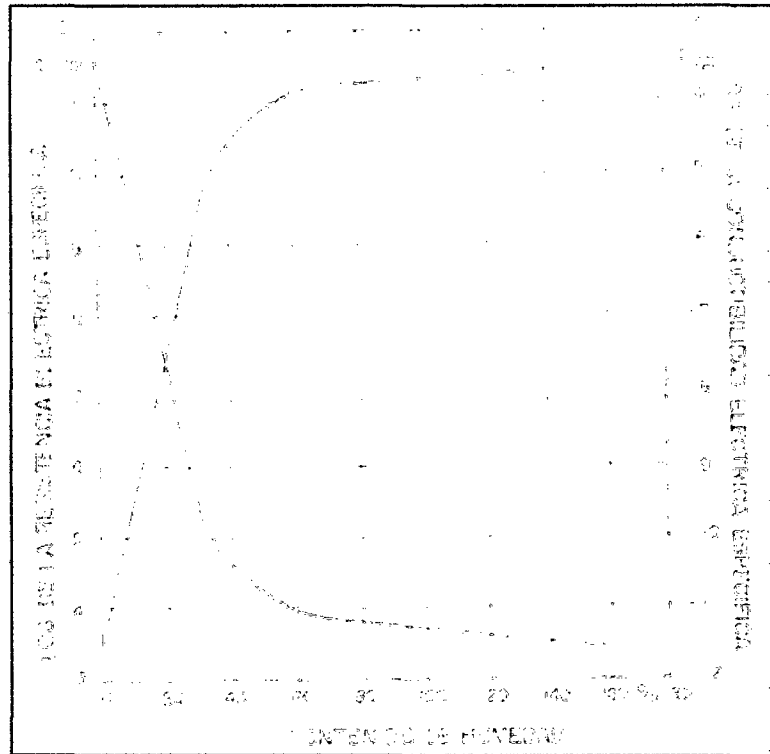
$$\log r = 13.25 - 0.32 * CH \quad (2)$$

Dónde:

$r$  : Resistencia eléctrica a través del grano (ohmios)

$CH$ : Contenido de Humedad de la madera (%)

En la figura 4, [12], [21], se muestra la gráfica resultante de la relación entre el Contenido de Humedad y su Resistencia Eléctrica correspondiente.



**Figura 4. Curva de resistencia y conductividad eléctrica**

### **2.1.2. Contenido de Humedad de Equilibrio**

Cuando se deja a la madera en un ambiente cualquiera, esta comienza a perder humedad, tendiendo hacia una curva, hasta alcanzar un valor límite; a este valor límite se denomina “Contenido de Humedad de Equilibrio” y depende de las condiciones climáticas del medio en el cual se encuentra la madera. Las más importantes de estas condiciones son la temperatura del aire y la humedad relativa ambiente, [12], [19], [14], [27], [21].

En la tabla 5, [19], se muestra los diferentes valores que puede tomar el Contenido de Humedad en Equilibrio dependiendo de los valores de la Temperatura y Humedad Relativa.

Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)									
	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80
10	7.2	7.8	8.6	9.4	10.3	11.2	12.5	13.8	15.2	17.0
15	7.0	7.7	8.5	9.3	10.2	11.0	12.2	13.5	14.9	16.8
20	6.7	7.5	8.3	9.2	10.0	10.9	12.0	13.4	14.6	16.5
25	6.5	7.4	8.2	9.0	9.8	10.8	11.8	13.2	14.4	16.1
30	6.4	7.3	8.0	8.8	9.6	10.6	11.5	12.9	14.2	15.8
35	6.3	7.1	7.8	8.5	9.4	10.3	11.2	12.5	13.8	15.4
40	6.2	6.8	7.5	8.3	9.2	10.0	11.0	12.2	13.4	15.0

**Tabla 5. Contenido de Humedad en Equilibrio.**

### 2.1.3. Gradiente de Secado de Madera

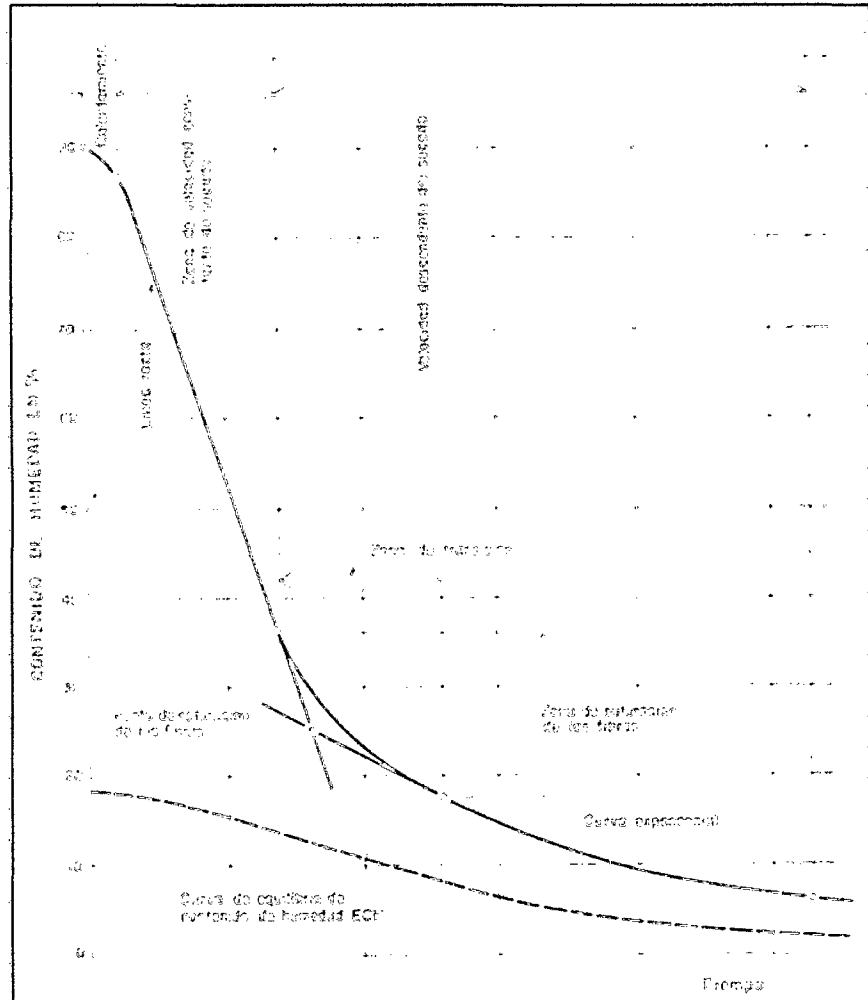
El gradiente de secado de madera es la relación entre la humedad contenida en la madera y la humedad de equilibrio a condiciones de temperatura y humedad relativa del medio ambiente, [12], [21].

### 2.1.4. Curvas de la madera

Toda la teoría vista se puede resumir en los siguientes gráficos:

**Curva de secado**, [23], [28], [21], representa el contenido de humedad de una determinada especie de madera con respecto al tiempo; la forma de esta curva (de manera ideal) es la misma para todos los tipos de madera y únicamente se diferencia en el tiempo que le toma llegar a su contenido de humedad de equilibrio seco ( $CHE = 0$ ). Cabe resaltar que este valor es teórico y que no se puede alcanzar porque traería como consecuencia la destrucción de la madera.

En la figura 5, [21], se muestra la curva de secado ideal correspondiente a la madera.



**Figura 5. Curva de Secado Ideal de la madera**

**Curva de velocidad de secado, [23],** relaciona la rapidez de pérdida de agua en la madera para un contenido de humedad en particular; igual que en el caso de la curva de secado (de manera ideal), la forma es básicamente la misma para todas las especies solo que aquí se diferencian en su valor máximo que determinara si una especie se seca más rápido.

En la figura 6, [23], se muestra la curva que relaciona el Contenido de Humedad de la Madera con la Rapidez de Secado.

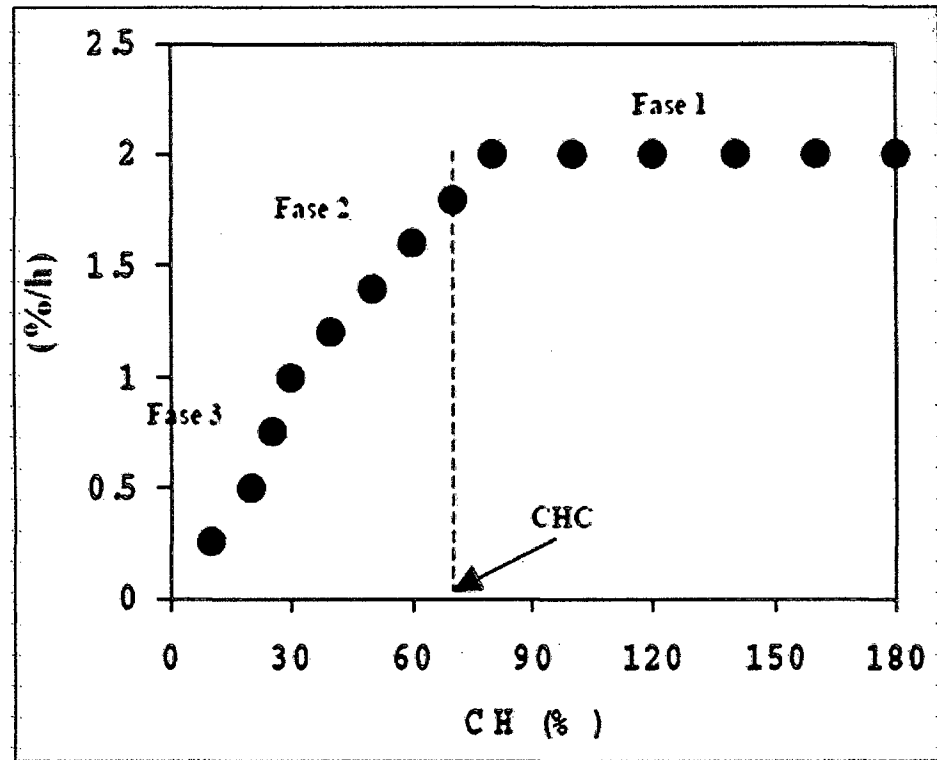
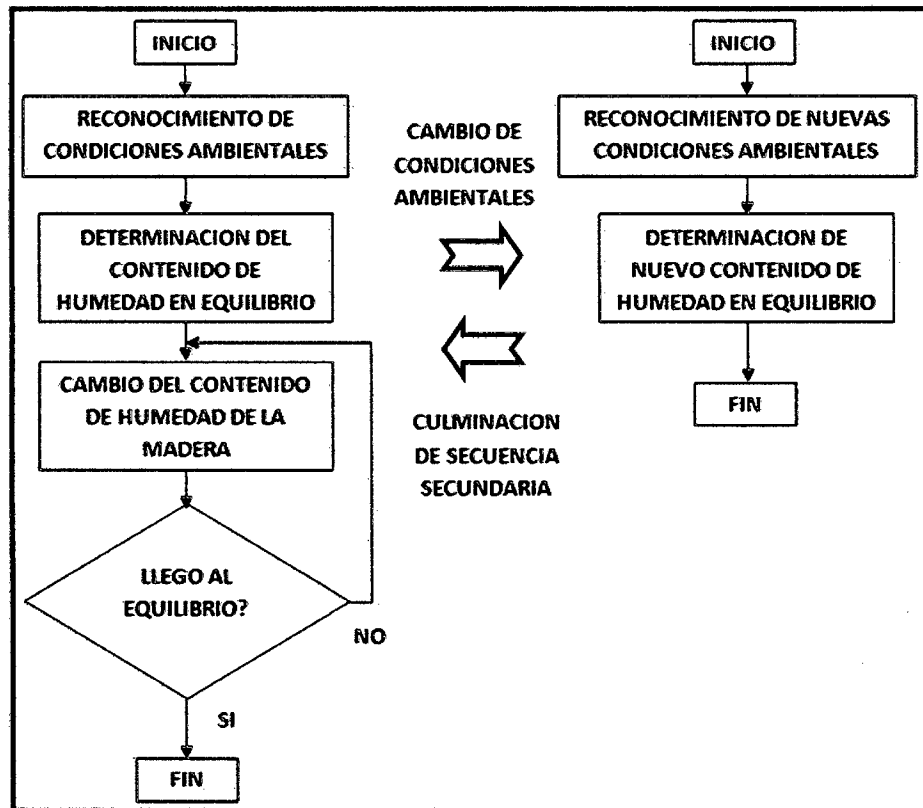


Figura 6. Curva de Velocidad de Secado Ideal de la madera

## 2.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE SECADO

Luego de haber visto los principios físicos relacionados con la madera, presentamos en la figura 7 los diagramas de flujo correspondientes al proceso de secado de la madera en función de las condiciones ambientales donde se encuentra; cabe resaltar que el diagrama de flujo de la izquierda representa el proceso principal mientras que el diagrama de flujo de la derecha representa aquel proceso que se inicia en cualquier momento que cambie las condiciones ambientales.



**Figura 7. Proceso de Secado de la Madera.**

El proceso de secado depende en gran medida de los siguientes factores:

- La velocidad del aire que circula sobre la madera, a mayor velocidad aumenta la capacidad de arrastre, pero exceso de aire provocaría un resecaimiento de la superficie de la madera generando esfuerzos que pueden dañar la madera o interrumpir en algunos casos el proceso de secado de madera, [21].
- La temperatura y humedad relativa del ambiente al que se expone la madera, si aumentamos la temperatura, aumenta la capacidad del aire de contener vapor de agua, lo que quiere decir que puede absorber

mayor cantidad de vapor de agua de la madera. Igualmente si extraemos vapor de agua del aire, bajamos su humedad relativa y aumenta la capacidad de sacar vapor de la madera. A una humedad relativa dada, hay un valor de equilibrio de la humedad de la madera. De allí ya no pierde más humedad. Por eso es que tenemos que ir variando las condiciones del ambiente a medida que la madera se va secando, [21].

- El gradiente de humedad, este es el criterio más importante para un adecuado proceso de secado de madera en hornos. Un gradiente muy bajo puede prolongar el tiempo de secado de la madera excesivamente, mientras que un gradiente muy alto aceleraría mucho el proceso pero seguramente traería consecuencias graves en la calidad de la madera o la interrupción del secado de la madera. Los valores normales están entre 1.5 y 2.5, donde esto último depende mucho de la especie, [21].
- El tipo de madera, como se mencionó antes, al exponer a la madera a un ambiente cualquiera, esta tiende a perder humedad, siguiendo una curva, hasta alcanzar el Contenido de Humedad en Equilibrio correspondiente a las condiciones del ambiente; sin embargo, depende también mucho del tipo de madera con que se trabaje ya que algunas demoran más tiempo que secar que otras (cuando se exponen al aire libre), aunque siguen el mismo comportamiento, [6], [21].



De todos los factores mencionados, la temperatura y la humedad relativa serán las variables que controlaremos para el proceso de secado de madera, mientras que el gradiente de humedad será usado como indicador para determinar si el control aplicado es el adecuado.

### **2.3 CONSIDERACIONES PARA EL SECADO**

Muchos defectos de la madera aserrada se presentan antes de someterla a un proceso de secado. La madera en troza puede rajarse por una excesiva sequedad en los extremos; también puede ser atacada por insectos y hongos. Después del aserrado la madera queda aún más propensa al deterioro por agentes naturales ya que no tiene la corteza que ofrecía protección en su estado rollizo, [14], [27], [21].

Por este motivo, son de mucha importancia todas las medidas preventivas que pueden tomarse para evitar daños estructurales o de apariencia en la madera aserrada, antes de ser sometida al secamiento.

#### **2.3.1 Protección contra Formación de Grietas, Rajaduras y Deformaciones**

Toda madera aserrada con espesor mayor a 4 cm, sobre todo si es densa, tiende a rajarse en sus extremos o agrietarse en su superficie durante su secamiento. Estos defectos son más frecuentes cuando queda expuesta a los rayos del sol o a vientos fuertes.

Para evitar estos defectos, generalmente se utilizan sustancias resistentes a la humedad capaces de evitar la rápida evaporación del agua a lo largo del grano de la madera, [27].

### **2.3.2 Apilamiento de la Madera Dentro del Secador**

La construcción de la pila del horno es de importancia primordial. Aún si todos los demás factores son perfectos, su falla representará, con seguridad, la degradación del material en forma de combaduras, revirado o torceduras, rajaduras en extremos y desigual contenido de humedad en las piezas. La pila debe estar bien alineada vertical y horizontalmente. El tamaño de la carga dependerá de la capacidad y tipo de secador a ser empleado. Hay muchas precauciones que deben ser rígidamente observadas para asegurar la máxima tasa de secado con el mínimo daño del material que se indican a continuación.

#### **Separadores**

Los separadores deben ser de un espesor uniforme, entre 12 mm ( $\frac{1}{2}$ " ) y 25 mm (1"), los más delgados se usan cuando se quiere disminuir la tasa de secado de la madera. Se prefieren anchos entre 25 mm (1") y 37 mm ( $1\frac{1}{2}$ "). Los separadores deben estar exactamente alineados en dirección vertical y espaciados hasta 60 cm (2'), uno del otro en la misma fila, [27].

### **Sobresalido de Extremos**

Los extremos de las piezas deben quedar alineados porque los que sobresalgan, al no estar soportados, se curvarán bajo su propio peso y se deformarán. Esto afecta a la tabla en particular y al resto de la pila, pudiendo causar distorsión en toda la carga. Por otro lado, con el sobresalido de los extremos, el secado de esas piezas es más rápido con respecto al resto de la pila y puede presentarse un severo agrietamiento de los extremos. El problema antes mencionado se puede evitar clasificando los largos de la madera a secar antes de armar la pila, [27].

### **Soportes y Contrapesos de la Pila**

Cuando la madera es muy susceptible al alabeo, se pueden colocar contrapesos encima de la capa superior de la pila consistentes en prensas de resortes, piezas de durmientes en desuso o moldes de hormigón que apliquen una presión entre 250 y 1000 kg/m<sup>2</sup>, dependiendo de la especie de madera, el espesor del material y el grado de reducción de la deformación deseada, [27]. Estos contrapesos ayudan a estabilizar la carga, especialmente de las hileras superiores de madera, que es donde se presentan las torceduras.

### 2.3.3 Selección de Muestras

Para poder llevar un control adecuado del proceso de secado de madera usando el método eléctrico, y con el fin de no estropear la madera a secar al colocar las sondas eléctricas, se deben de usar pequeños trozos de madera (muestras) de la misma especie a secar, colocarlas a lo largo del apilamiento e incrustar en estas las sondas.

Por lo general, las muestras se eligen durante la fase del apilado de la madera. El número de muestras de secado a tomar es como mínimo 4 por cada 20 m<sup>3</sup> (8500 pies-tabla), y de 10 a 12 muestras por cada carga de 100 m<sup>3</sup> (42000 pies-tabla) o más, del horno secador y su localización dentro del horno varía con el tamaño, tipo y eficiencia de la cámara, [27]. Es importante que las muestras no impidan el flujo de aire y que éstas se ubiquen de modo que el aire circule en igual forma que en el resto de la pila.

En la figura 8, [6], se observa la forma de apilar los tablones de madera.



**Figura 8. Forma de Apilar la Madera**

#### **2.3.4 Horarios de Secado**

Después de tener las muestras de secado ubicadas en la pila y determinados sus contenidos de humedad, se procede a seleccionar un programa de secado para el material.

Los programas u horarios de secado consisten en una tabla de temperaturas y depresiones psicrométricas que sirven de guía al operador para secar una madera dada, con rapidez razonable y con el menor deterioro posible, [14], [28], [27], [21].

En vista de los múltiples factores que intervienen en el secado de la madera y la variedad existente de diseños de hornos en funcionamiento, ningún programa u horario se considera como ideal, [27], [21].

Se debe de resaltar que estos horarios de secado no solo dependen del tipo de especie a secar sino también del espesor de las tablas a secar y que, por lo general, estos se denomina mediante códigos que establecidos, [27], [21].

#### **2.3.5 Verificación de la Calidad de Secado**

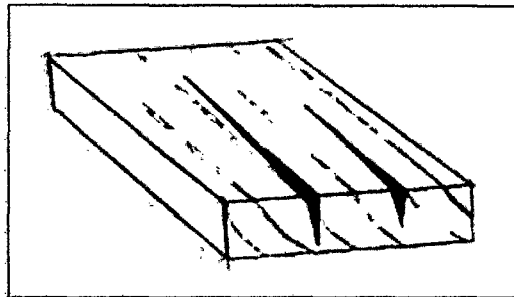
La madera es un producto natural que cede o absorbe humedad de acuerdo a las condiciones del medio ambiente que la rodea.

Durante el proceso de secado de la madera, esta sufre un cambio en sus propiedades naturales, donde estos pueden ser, en algunos casos, irregulares; por tanto, se denomina defecto de la madera a cualquier irregularidad que reduzca su durabilidad, resistencia, valor estético o volumen utilizable.

Estos denominados defectos que aparecen durante el proceso de secado de la madera reducen el valor económico de este debido a los motivos ya mencionados; es por esta razón que un indicador de la calidad será la ausencia o poca presencia de defectos en la madera al final del secado. Pasamos a continuación a mencionar los defectos más comunes durante el secado de la madera.

### **Grietas Capilares**

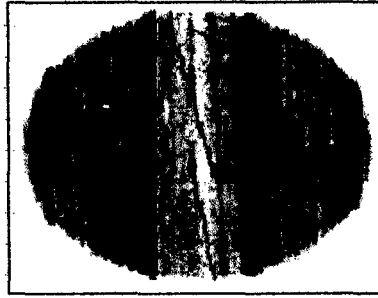
Estas fisuras se abren cuando los esfuerzos de secado iniciales superan la propia resistencia de la madera a la tracción perpendicular a las fibras y no se efectuó un proceso de vaporización intermedio para aliviar dichas tensiones.



**Figura 9. Grietas capilares**

### **Grietas Superficiales**

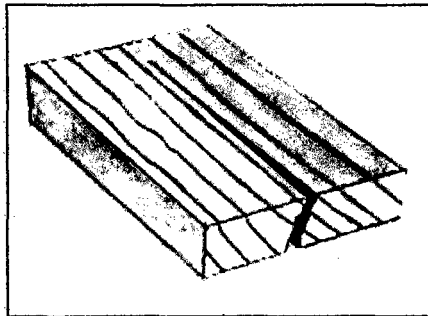
Se forman en las primeras etapas del secado, debido a que las superficies se secan muy rápidamente, como resultado de una humedad relativa muy baja. Ocurren en los radios, canales de resina, o manchas minerales.



**Figura 10. Grietas superficiales**

### **Hendidura**

Grieta que atraviesa toda la pieza de madera, generalmente en los extremos. Se suelen dar cuando el secado exterior se ha producido de forma más rápida que en la parte interior.



**Figura 11. Hendidura**

### **Deformaciones**

Se originan en las diferencias de las contracciones longitudinal, radial y tangencial y se manifiestan, en una pieza de madera aserrada, mediante la curvatura de sus ejes longitudinales, transversales o ambos.

### **CAPITULO 3**

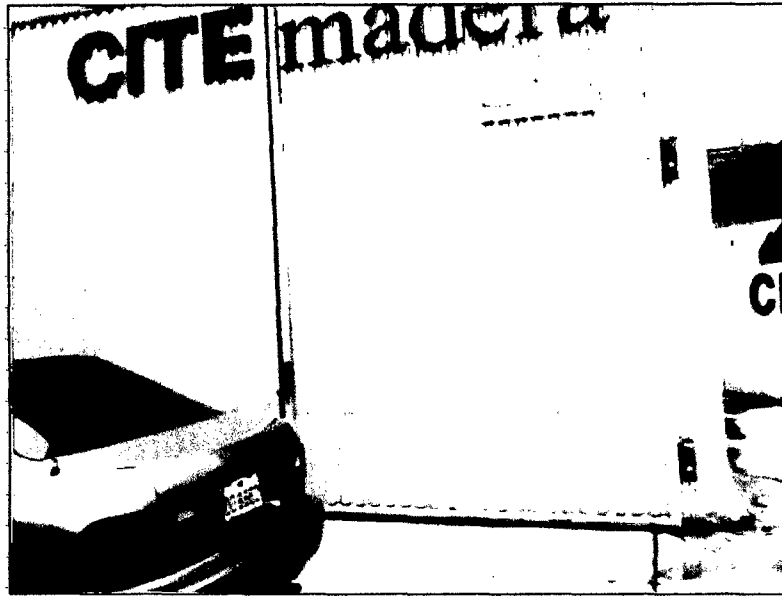
## **DESCRIPCIÓN DE EQUIPOS DE SECADO DE MADERA CONVENCIONAL**

Los secadores convencionales son cámaras o compartimientos cerrados, dotados de ventiladores que dan lugar a una circulación forzada del aire dentro de la cámara; disponen, también, de un sistema de calefacción controlado que permite elevar la temperatura del horno y dispositivos regulables para conseguir la variación deseada de la humedad relativa en el ambiente interior del horno.

Todo secador de madera debe tener un buen aislamiento térmico, ser de construcción hermética, fabricarse de materiales resistentes a la corrosión y elevadas temperaturas, y disponer de puertas de fácil manejo y cierre hermético.

El presente capítulo tiene como objetivo hacer una descripción de cada uno de los sistemas que componen un secador de madera convencional tomando como ejemplo el secador de la empresa **CITEMADERA S.A.** tal y como se muestra en la figura 12.





**Figura 12. Vista exterior del secador de la empresa CITEMADERA**

### **3.1 DESCRIPCION DEL SISTEMA DE CALEFACCION**

El calor necesario para elevar la temperatura del secador y para asegurar que la difusión o movimiento de la humedad desde el interior de la pieza de madera hacia la periferia se mantenga o aumente. En términos generales, la calefacción en un secador sirve para lo siguiente:

- Facilitar y acelerar la evaporación en la superficie húmeda de la madera.
- Calentar el aire fresco que entra al secador.
- Reemplazar el calor perdido por radiación a través de las paredes del secador.

El método usual de calentamiento de un secador es por radiadores de vapor, en forma de serpentines. En secadores calentados indirectamente con petróleo, gas, carbón, madera o aserrín, los productos de la combustión son transportados por

tubos hasta un sistema de intercambiadores de calor o radiadores localizado dentro del secador. En la figura 13 se muestra un Quemador Dual de Gas Natural/Petróleo usada por la empresa **CITEMADERA**.



**Figura 13. Quemador dual de Gas Natural/Petróleo usado para el Secador de la empresa CITEMADERA**

### **3.2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE HUMIDIFICACIÓN**

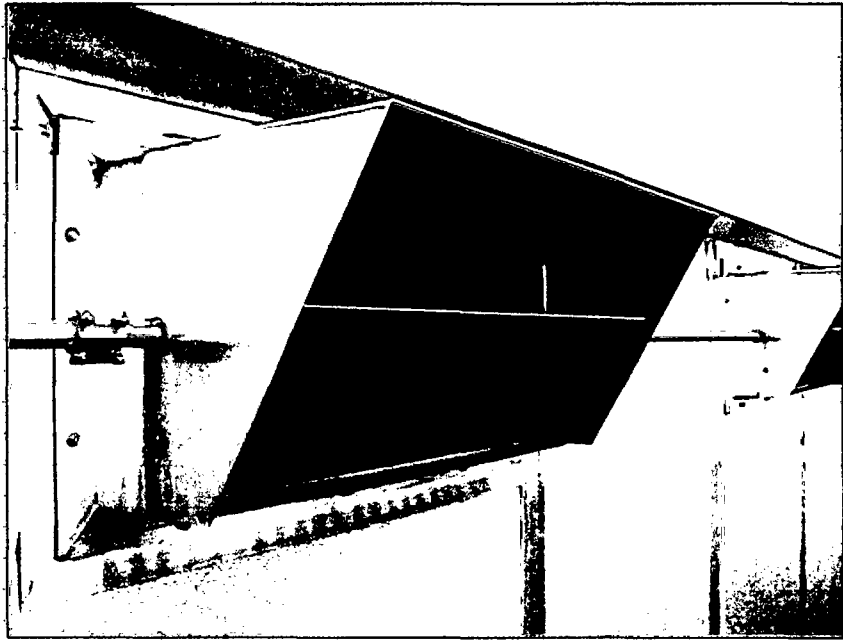
Está compuesto por los dispositivos de inyección de vapor o agua y de los elementos de aspersión. En la figura 14 se muestran los aspersores empleados por la empresa **CITEMADERA** para humedecer el ambiente dentro de su secador y uniformizar la humedad de la madera.



**Figura 14. Aspersores de vapor usados en el secador de la empresa  
CITEMADERA**

### **3.3 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE VENTILACIÓN**

Este sistema está compuesto de ventiladores, cuyos ejes están conectados a motores eléctricos ubicados dentro o fuera del secador, y de ductos de ventilación (dampers) que se encargan de controlar el ingreso y salida del aire. Además, con el fin de orientar adecuadamente el flujo de aire y cubrir los espacios vacíos entre o en las pilas, se colocan deflectores (baffles) en el falso techo. En las figuras 15 y 16 se muestran los ductos de ventilación y el falso techo usado en la empresa CITEMADERA para su secador.



**Figura 15. Ductos de aire usados en el secador de la empresa**

**CITEMADERA**



**Figura 16. Falso Techo donde se ubican los deflectores y**

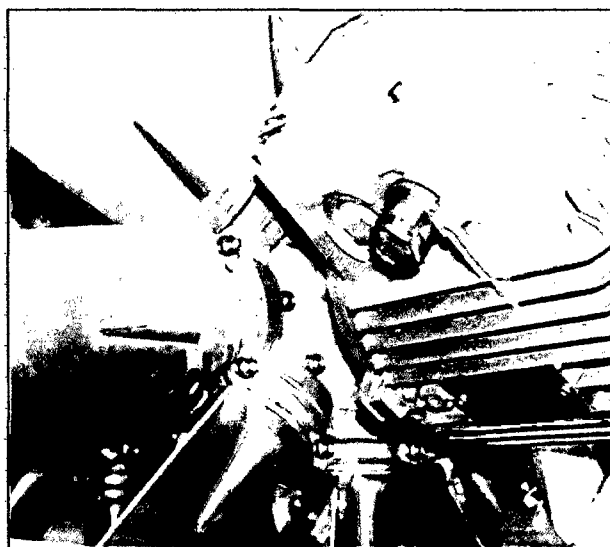
**Ventiladores usados en el secador de la empresa**

**CITEMADERA**

En las figuras 17 y 18 se muestran los ventiladores usados por la empresa CITEMADERA así como su ubicación dentro del falso techo y el acople a sus respectivos motores eléctricos.



**Figura 17. Ventiladores usados en el secador de la empresa  
CITEMADERA**



**Figura 18. Acople del ventilador con el motor eléctrico**

### 3.4 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL

La temperatura y la humedad relativa dentro de un secador deben controlarse cuidadosamente, si se desea secar rápidamente la madera con un mínimo de defectos. La falta de control puede echar a perder en pocos minutos toda la carga de madera que se haya colocado dentro del horno.

Un prerequisite para el control del proceso de secado es la medición exacta de los diferentes valores que caracterizan el estado de humedad de la madera y las condiciones climáticas del horno.

Por tanto, el sistema de control se encarga de controlar y optimizar el proceso de secado mediante equipos electrónicos computarizados, sensores, actuadores, etc.

#### 3.4.1 Controladores

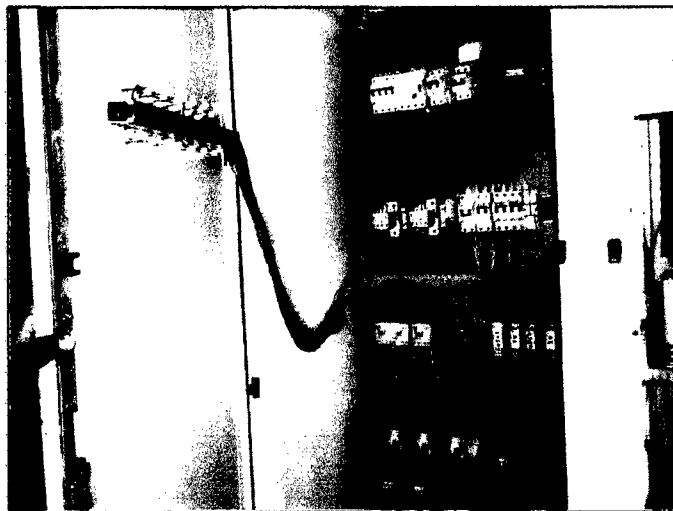
Son los encargados de recibir todas las variables, analizarlas, procesarlas y tomar una acción sobre los actuadores para controlarlas. En la figura 19 se muestra el controlador usado por la empresa CITEMADERA.



**Figura 19. Controlador usado en el secador de la empresa  
CITEMADERA**

### 3.4.2 Interfaces

Viene a ser una etapa intermedia entre los actuadores y el sistema de control dado que las señales provenientes del controlador son pequeñas en comparación con las requeridas por los actuadores como es el caso de la etapa de potencia existente entre el controlador y los motores del sistema de ventilación o los conocidos tableros de control. En la figura 20 se muestra el tablero de control usado en la empresa CITEMADERA.



**Figura 20. Tablero de control usado en el secador de la empresa  
CITEMADERA**

### 3.4.3 Sensores

En una cámara de secado de madera automatizado, en general, están presentes los siguientes sensores:

- Sensores de Temperatura
- Sensores de Humedad Relativa
- Sensores de Contenido de Humedad

## **CAPITULO 4**

### **MODELAMIENTO MATEMATICO DE LA PLANTA**

#### **4.1 CONCEPTOS GENERALES DE TERMODINAMICA Y PSICROMETRÍA**

En la presente sección, se darán a conocer conceptos generales relacionados a Termodinámica y Psicrometría los cuales serán usados como base para el modelamiento de la planta a controlar; para el presente caso, dicha planta viene a estar compuesta por las condiciones ambientales internas de la cámara de secado y de la madera.

##### **4.1.1 Conceptos Generales de Termodinámica**

La termodinámica es una rama de la física que estudia los efectos de los cambios de la temperatura, presión y volumen en los sistemas físicos a un nivel macroscópico.



### Sistema Termodinámico

Es un conjunto de materia que está limitado por una superficie definida por el observador, sea real o imaginaria.

### Volumen de Control

Es un sistema termodinámico con la propiedad de admitir la posibilidad de entradas y salidas de masa e intercambiar calor con una fuente térmica y trabajo con una o varias fuentes de trabajo.

### Superficie de Control

Separa el volumen de control del exterior. Es una frontera imaginaria que puede tener límites reales o imaginarios tal y como se muestra en la figura 21:

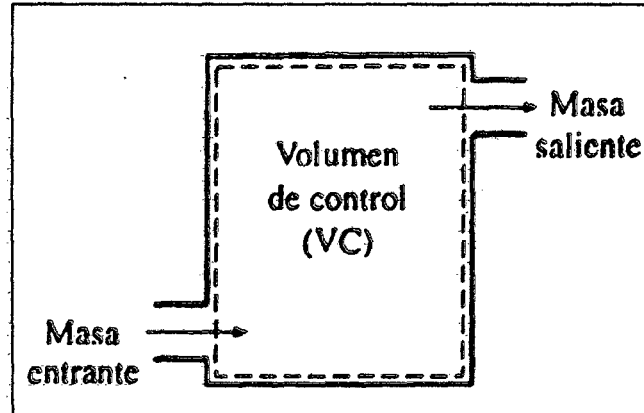


Figura 21. Volumen de Control

### Variables Termodinámicas

Las variables que tienen relación con el estado interno de un sistema se denominan variables termodinámicas; entre dichas variables tenemos:

- La masa
- El volumen
- La densidad
- La presión
- La temperatura
- Volumen Específico.

### **Propiedades Termodinámicas**

Una propiedad termodinámica es aquella que varía en el mismo sentido que la temperatura, es decir, si la temperatura aumenta su valor, la propiedad también lo hará, y viceversa. Para el rango de análisis del presente trabajo, se considera que la presión y la entalpía varían en el mismo sentido que la temperatura.

### **Estado de un Sistema Termodinámico**

Un sistema descrito en función de propiedades termodinámicas se denomina sistema termodinámico y la situación en la que se encuentra definido por dichas propiedades se denomina estado del sistema.

### **Procesos Termodinámicos**

Se dice que un sistema pasa por un proceso termodinámico, o transformación termodinámica, cuando al menos una de las variables termodinámicas no cambia. Los procesos más importantes son:

- **Procesos isotérmicos:** son procesos en los que la temperatura no cambia.
- **Procesos Isobáricos:** son procesos en los cuales la presión no varía.
- **Procesos Isócoros:** son procesos en los que el volumen permanece constante.
- **Procesos adiabáticos:** son procesos en los que no hay transferencia de calor alguna.

Para el presente trabajo, se asume que el aire seco dentro del secador sigue un proceso isocórico mientras que el aire húmedo sigue un proceso isobárico.

### **Tablas Termodinámicas**

Se denomina así a aquellas tablas en donde se encuentran registrados los valores que toman las diferentes variables termodinámicas de una sustancia en función de la temperatura y/o presión de dicha sustancia.

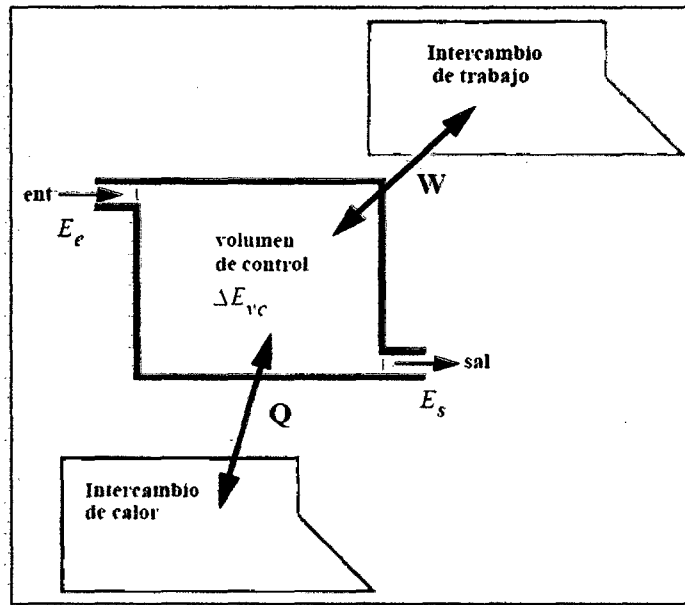
### **Primera Ley de la Termodinámica**

También conocida como principio de conservación de la energía la cual establece que si se realiza trabajo sobre un sistema o bien éste intercambia calor con otro, la energía interna del sistema cambiará. Visto de otra forma, esta ley permite definir el calor como la energía necesaria que debe intercambiar el sistema para compensar las diferencias entre trabajo y energía interna.

El principio de la conservación de la energía se expresa en la ecuación (3):

$$E_{entra} - E_{sale} = \Delta E_{sistema} \quad (3)$$

Esta ecuación será usada en su forma diferencial para el desarrollo de las ecuaciones que describen el comportamiento del aire dentro del secador, cuya aplicación se puede observar en la figura 22.



**Figura 22. Esquema de la Primera Ley**

**Nota:**

La ecuación (3) también se puede aplicar para el principio de conservación de la masa que también se usará en el presente trabajo.

**Energía Interna**

La energía interna de un sistema intenta ser un reflejo de la energía a escala microscópica. Representa la suma de:

- La energía cinética interna; es decir, la suma de las energías cinéticas de las partículas que conforman el cuerpo respecto al centro de masas del sistema.
- La energía potencial interna, que es la energía potencial asociada a las interacciones entre estas individualidades.

La energía interna no incluye la energía cinética de traslación y/o de rotación del sistema completo. Tampoco incluye la energía potencial que el cuerpo pueda tener por su localización en un campo gravitacional o electrostático externo.

### **Entalpía**

La entalpía es una variable de estado (depende de los estados inicial y final) que se define como la suma de la energía interna de un sistema termodinámico y el producto de su volumen con su presión.

### **Calores Específicos**

Es la energía necesaria para incrementar en una unidad de temperatura una cantidad de sustancia.

Para hallar dicho calor específico, se divide el incremento de temperatura en  $N$  intervalos pequeños  $\Delta T_n$  suponiendo  $C_n$  constante en los intervalos pequeños obteniéndose así la ecuación (4):

$$Q = \sum_{n=1}^N mC_n \Delta T_n \quad (4)$$

Considerando infinitos dichos incrementos, se obtiene la ecuación (5):

$$Q = \int mC_n dT \quad (5)$$

Derivando la expresión (5) respecto del tiempo, se obtiene la ecuación (6):

$$\frac{d}{dt} Q = \dot{Q} = mC_n \frac{d}{dt} T \quad (6)$$

Dónde:

$\dot{Q}$ : Flujo de calor que absorbe o cede el cuerpo

En termodinámica, interesan dos clases de calores específicos:

**Calor Específico a Volumen Constante**, es la energía requerida para elevar la temperatura de una masa unitaria de una sustancia por un grado mientras su volumen se mantiene constante.

Se puede demostrar que dicha constante queda expresada mediante la ecuación

$$(7): \quad C_v = \frac{dU}{dT} \quad (7)$$

**Calor Específico a Presión Constante**, es la energía requerida para elevar la temperatura de una masa unitaria de una sustancia por un grado mientras su presión se mantiene constante.

Se puede demostrar que dicha constante queda expresada mediante la ecuación

$$(8): \quad C_p = \frac{dh}{dT} \quad (8)$$

#### 4.1.2 Conceptos Generales de Psicrometría

Trata de las propiedades termodinámicas del aire húmedo y del efecto de la humedad atmosférica sobre los materiales y el confort humano.

**Aire Húmedo**

Es una mezcla de aire seco y vapor de agua donde la cantidad de vapor de agua varía desde cero hasta un máximo que depende de la temperatura y la presión. Las condiciones máximas se refieren a la saturación, estado neutral de equilibrio entre el aire húmedo y la fase de agua condensada.

**Peso molecular del Aire seco:** 28.9645 (escala del carbono-12).

**Constante particular del aire seco:** 53.352

**Peso molecular del Agua:** 18.01528 (escala del carbono-12).

**Constante particular del aire seco:** 85.778

**Temperatura de bulbo seco**

Es la verdadera temperatura del aire húmedo y con frecuencia se le denomina sólo temperatura del aire; es la temperatura del aire que marca un termómetro común.

**Temperatura de bulbo húmedo**

Es aquella temperatura que tendría un volumen de aire saturado y con la cual sería capaz de entregar la misma energía a su temperatura de bulbo seco.

**Humedad Específica**

Se define como la relación entre la masa de vapor de agua y la masa de aire seco en un volumen dado de mezcla expresada mediante la ecuación (9):

$$W = \frac{m_{agua}}{m_{aire}} \quad (9)$$

### Presión de vapor

Es la presión parcial que ejercen las moléculas de vapor de agua presentes en el aire húmedo.

Dicha presión parcial de vapor se expresa mediante la ecuación (10):

$$P_v = P_a * \frac{W_a}{W_a + 0.62198} \quad (10)$$

Dónde:

$P_a$  : Presión Atmosférica, para nuestro estudio es igual a 14.7 PSI.

$W_a$  : Humedad Especifica del Aire ( $Kg_{ww}/Kg_{da}$ )

### Presión de Vapor Saturado

Representa la presión que ejerce la cantidad máxima de vapor de agua que puede contener el aire a una temperatura dada. La presión de vapor de un líquido es constante a una temperatura dada pero aumenta si lo hace la temperatura hasta el punto crítico del líquido. Cuando se aumenta la temperatura, las moléculas toman la energía necesaria para hacer el cambio de líquido a vapor y, en consecuencia, se precisa mayor presión para establecer un equilibrio entre el vapor y el líquido donde dicho equilibrio se denomina "Estado Saturado".

La energía requerida para mantener dicho equilibrio se puede expresar por la ecuación de Clausius-Clapeyron (11), [25]:

$$\frac{d \ln P_{vs}}{dT} = \frac{\Delta H_v}{R_0 T^2} \quad (11)$$



Dónde:

$T$  : Temperatura del agua (°K)

$P_{vs}$  : Presión de Vapor Saturado (Pa).

$\Delta H_v$  : Calor latente de vaporización del agua ( $\frac{Kj}{Kg}$ )

$R_0$ : Constante de Gas para el vapor de agua ( $\frac{Kj}{Kg^\circ K}$ )

**Nota:**

La aplicación de la ecuación de Clausius-Clapeyron para el aire húmedo solo tiene validez en el rango de 0 a 100 °C.

### **Humedad relativa (HR)**

Se define como la razón entre la presión de vapor de agua en un momento dado ( $P_v$ ) y la presión de vapor de agua cuando el aire está saturado de humedad ( $P_{vs}$ ), a la misma temperatura la cual se expresa en la ecuación (12):

$$HR = 100 * \frac{P_v}{P_{vs}} \quad (12)$$

Dónde:

$P_v$  : Presión de Vapor presente en el Aire Húmedo (PSI).

$P_{vs}$ : Presión de Vapor Saturado del Aire Húmedo a una Temperatura dada (PSI).

**Nota:** La ecuación (12) tiene como restricción a la inequación (13):

$$0 \leq HR \leq 100(\%) \quad (13)$$

### Calor Especifico del Aire Húmedo

Se puede demostrar que el Calor Especifico del Aire Húmedo, a volumen o presión constante, queda expresado por las ecuaciones (14) y (15), [7], [11]:

$$C_{wa} = C_{da} \frac{1+W\xi}{1+W} \quad (14)$$

$$\xi = \frac{C_w}{C_{da}} \quad (15)$$

Dónde:

$C_{wa}$ : Calor Específico del Aire Humedo (Variable)

$C_{da}$ : Calor Específico del Aire Seco (Constante)

$C_w$ : Calor Especifico del Vapor de Agua (Constante)

## 4.2 CONCEPTOS GENERALES DE INGENIERÍA DE CONTROL

### 4.2.1 Modelo Matemático

Se define así a un conjunto de ecuaciones que representan la dinámica del sistema con precisión o, al menos, bastante bien.

Existen varias formas de representar un modelo matemático; sin embargo, para el presente trabajo, nos centraremos en dos tipos:

**Función de transferencia**, se define como el cociente entre la transformada de Laplace de la salida (función de respuesta) y la transformada de Laplace de la entrada (función de excitación) bajo la suposición de que todas las condiciones iniciales son cero.

Considere el sistema lineal e invariante con el tiempo descrito mediante la siguiente ecuación diferencial expresada mediante la ecuación (16):

$$a_0 y^{(n)} + a_1 y^{(n-1)} + \dots + a_{n-1} \dot{y} + a_n y = b_0 x^{(m)} + b_1 x^{(m-1)} + \dots + b_{m-1} \dot{x} + b_m x \quad (n \geq m) \quad (16)$$

Donde  $y$  es la salida del sistema y  $x$  es la entrada. La función de transferencia de este sistema se obtiene tomando la transformada de Laplace de ambos miembros bajo la suposición de que todas las condiciones iniciales son cero el cual se muestra en la ecuación (17):

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_0 s^m + b_1 s^{m-1} + \dots + b_{m-1} s + b_m}{a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_{n-1} s + a_n} \quad (17)$$

A partir del concepto de función de transferencia, es posible representar la dinámica de un sistema mediante ecuaciones algebraicas en  $s$ . Si la potencia más alta de  $s$  en el denominador de la función de transferencia es igual a  $n$ , el sistema se denomina *sistema de  $n$ -ésimo orden*.

**Ecuaciones en el espacio de estados**, viene a ser un conjunto de ecuaciones diferenciales que representan el comportamiento dinámico de un sistema cualquiera. Dicho conjunto de ecuaciones viene a estar representado por el sistema de ecuaciones (18):

$$\dot{x}(t) = f(x, u, t) \quad (18)$$

$$y(t) = g(x, u, t)$$

Donde la primera ecuación representa la **ecuación de estados** y la segunda ecuación representa la **ecuación de salida** del sistema.

Cuando (18) representa un **sistema lineal**, o se aproxima a uno alrededor de un punto de operación, se obtiene el sistema de ecuaciones (19):

$$\dot{x}(t) = A(t)x(t) + B(t)u(t) \quad (19)$$

$$y(t) = C(t)x(t) + D(t)u(t)$$

Dónde:

$A(t)$ : Matriz de estado

$B(t)$ : Matriz de entrada

$C(t)$ : Matriz de salida

$D(t)$ : Matriz de transmisión directa.

Si además (19) representa a un **sistema invariante con el tiempo**, se obtiene el sistema de ecuaciones (20):

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (20)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t)$$

#### 4.2.2 Controladores Automáticos

Un control automático compara el valor efectivo de salida de una planta con el valor deseado, determina la desviación y produce una señal de control que

reduce la desviación a cero o a un valor pequeño. La forma en que el control automático produce la señal de control recibe el nombre de “acción de control”. De acuerdo a la acción de control, los controles automáticos típicos industriales se pueden clasificar en:

**Control de dos posiciones o de sí-no**, el elemento accionador tiene solamente dos posiciones fijas que, en muchos casos, son simplemente de conectado o desconectado.

**Control proporcional**, la relación entre la salida del controlador  $m(t)$  y la señal de error actuante  $e(t)$  esta dada por la ecuación (21):

$$m(t) = K_p * e(t) \quad (21)$$

Donde la señal de error se expresa por la ecuación (22):

$$e(t) = ref - m(t) \quad (22)$$

**Control integral**, el valor de la salida del controlador  $m(t)$  varía proporcionalmente a la señal de error actuante  $e(t)$ . Dicha relación viene expresada por la ecuación (23):

$$m(t) = K_I * \int_0^t e(t) dt \quad (23)$$

**Control proporcional e integral**, queda definida por la ecuación (24):

$$m(t) = K_p * e(t) + K_I * \int_0^t e(t) dt \quad (24)$$

**Control proporcional, integral y derivativo**, este tipo de control queda definido por la ecuación (25):

$$m(t) = K_p * e(t) + K_D * \frac{de(t)}{dt} + K_I * \int_0^t e(t) dt \quad (25)$$

Se debe tener en cuenta que los valores tanto integral como derivativo no se pueden obtener de forma directa; en su lugar, sus valores se estiman (aproximan) mediante diversos algoritmos donde los más usados son el Método del Trapecio (Estimador Integral) y el Método de Aproximación hacia adelante (Estimador Diferencial) expresadas por las ecuaciones (26) y (27):

$$\int e(i)dt = \int e(i-1)dt + \frac{T}{2} * (e(i) + e(i-1)) \quad (26)$$

$$\frac{de(i)}{dx} = \frac{e(i) - e(i-1)}{T} \quad (27)$$

#### 4.2.3 Determinación del Comportamiento Dinámico del Sistema

##### Análisis de Respuesta en el Tiempo del Sistema

El sistema puede ser excitado con distintas señales de entrada. Las más utilizadas son las funciones impulso unitario, escalón unitario, rampa unitaria. La respuesta del sistema ante las distintas entradas suele tener un régimen transitorio y otro permanente, aunque este último puede no darse y depende de la estabilidad del sistema tal y como se muestra en la figura 23.

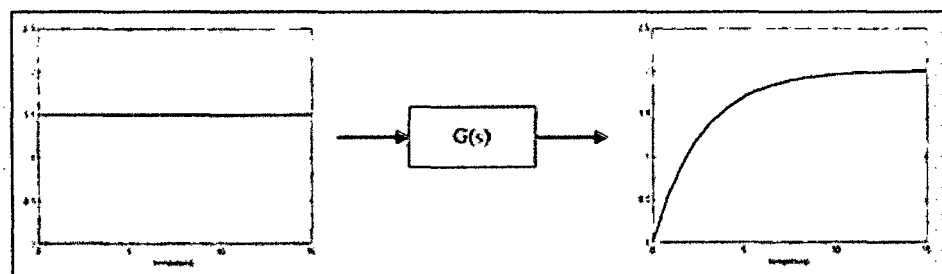
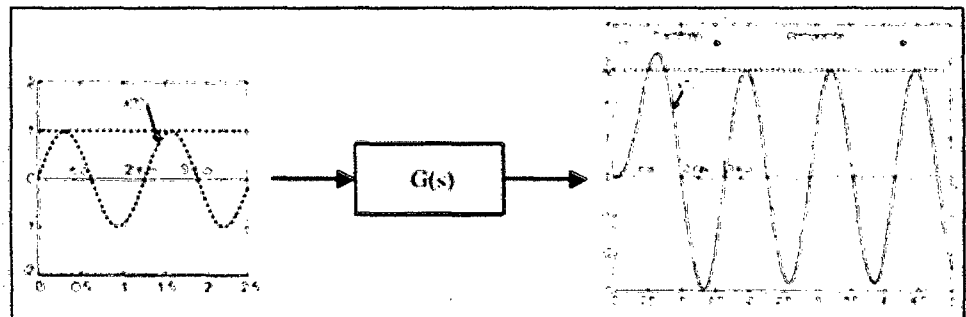


Figura 23. Análisis en el Tiempo de un Sistema Cualquiera

### Análisis de Respuesta en Frecuencia del Sistema

Se analiza la respuesta del sistema ante una entrada sinusoidal. Esto permite hallar la función de transferencia de un sistema con una planta compleja mediante un método práctico sencillo tal y como se muestra en la figura 24.



**Figura 24. Análisis en Frecuencia de un Sistema Cualquiera**

La representación de la respuesta en frecuencia de un sistema sirve para dar una medida de su estabilidad.

### 4.3 MODELAMIENTO MATEMÁTICO DE VARIABLES TERMODINÁMICAS Y PSICROMÉTRICAS RELACIONADAS AL PROCESO DE SECADO

Como se explicó en capítulos anteriores, el desarrollo del secado de la madera depende mucho de las condiciones ambientales tales como la Temperatura y la Humedad Relativa.

Por tanto, es objetivo de la presente sección dar a conocer el método seguido para hallar las ecuaciones de las variables termodinámicas y psicrométricas que intervienen directamente en el proceso de secado de la madera para así poder simular dicho proceso.

#### **4.3.1 Consideraciones y Restricciones para el Modelo Matemático**

Antes de comenzar con el modelamiento matemático de la planta (madera + secador), debemos definir primero todas las condiciones que se asumirán para el presente trabajo. Además, se deben establecer los resultados que se desean obtener una vez terminado el diseño del algoritmo de control neuro difuso.

##### **Descripción de la Cámara de Secado**

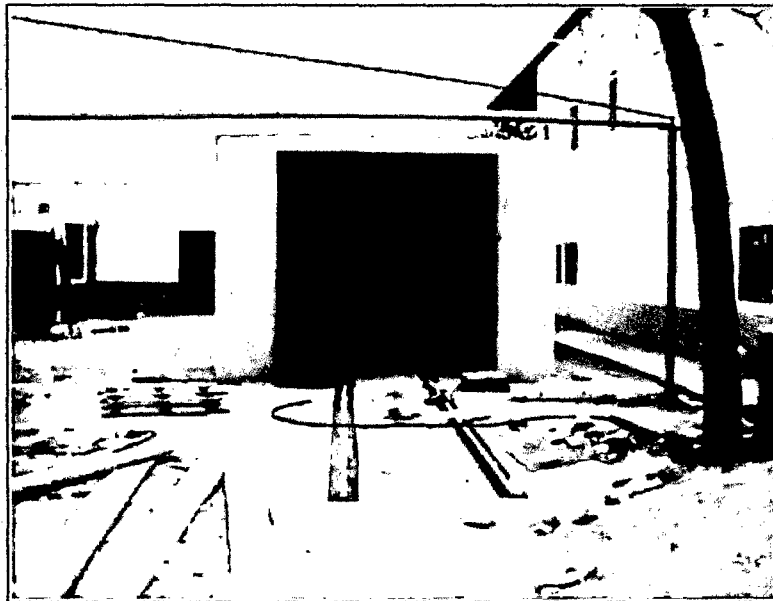
Se dispone de una cámara de secado con las siguientes características:

- Capacidad del Secador:
  - 5000 pies tablares de madera roble.
- Dimensiones de la cámara:
  - Longitud = 6.1m
  - Ancho = 3.8m
  - Alto = 2.8m.
- Construcción con buen aislamiento térmico
- 4 Intercambiadores que proporcionan el calor para calentar la cámara.

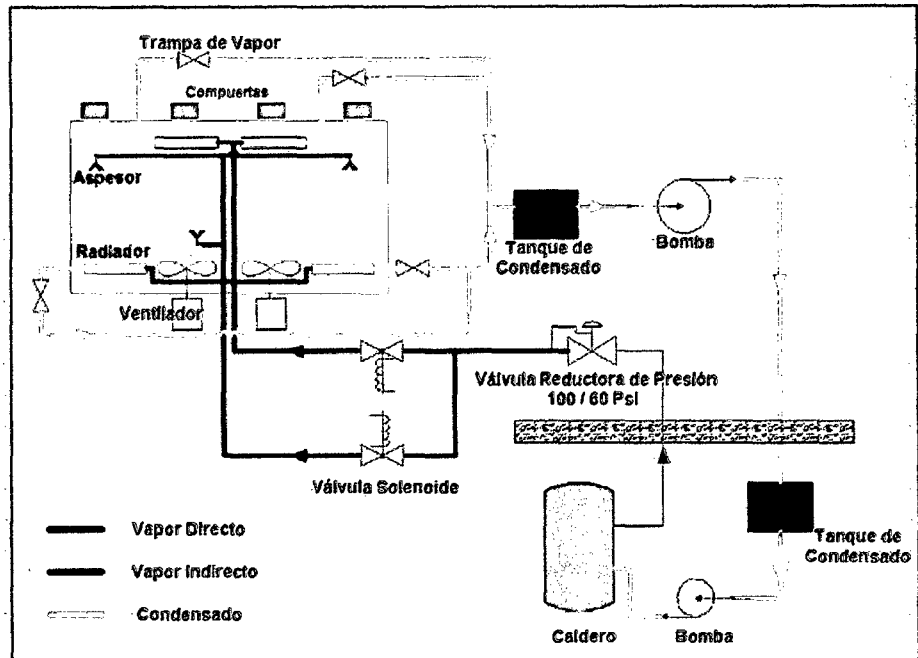


- 4 Trampas de Vapor conectadas a la salida de cada intercambiador.
- 2 Ventiladores para circulación de aire.
- 4 Aspersores para humidificar el aire del interior de la cámara.
- Un sistema de dampers para entrada y salida de aire.
- 3 Válvulas solenoides de tipo proporcional para controlar el paso de vapor de agua a los intercambiadores (vapor indirecto), a los aspersores (vapor directo) y la apertura o cierre de las compuertas de entrada y salida de aire.
- 1 Caldero que genera el vapor de agua.
- 1 Válvula Reductora de Presión conectada a la salida del caldero.

En las figuras 25 y 26, [12], se muestra la cámara de secado y la distribución de los componentes del sistema de secado, el cual fue prediseñado por el Centro de Energías Renovables (CER).



**Figura 25. Cámara de Secado del CER de la UNI**



**Figura 26. Diagrama de distribución del sistema de secado**

### **Consideraciones y Restricciones para el Modelo Matemático de las Condiciones Internas de la Cámara**

- Condiciones Ambientales Externas constantes.
- Propiedades Termodinámicas Uniformes dentro del secador.
- El flujo másico de aire seco que entra a la cámara es igual al flujo másico de aire seco que sale.
- Los ventiladores giran a velocidad constante durante todo el proceso de secado (tanto en velocidad como en sentido).
- El flujo másico de agua generado por las condiciones de aire saturado dentro de la cámara (se dará a conocer dicha variable en su

correspondiente sección) será absorbido por completo por la pila de roble.

- **Rango de Temperatura de Trabajo: [0-100] °C**

### **Consideraciones y Restricciones para el Modelo Matemático de la Madera Roble**

- **Contenido de Humedad Inicial: 80%**
- **Punto de Saturación de las Fibras (P.S.F.): 30 %**
- **Condiciones físicas y mecánicas uniformes en todas las tablas**
- **Rango de Temperatura de Trabajo: [0-100] °C**

### **Resultados Deseados con el Algoritmo de Control Neuro Difuso**

Aquí se establece los resultados deseados que se buscan con el diseño y la puesta en funcionamiento del algoritmo de control neuro difuso donde, a partir de dichos resultados, se verificará el buen funcionamiento de dicho algoritmo.

- **Contenido de Humedad Final: 9-13%**
- **Gradiente de Secado por Encima del P.S.F.: [4.5 - 20]**
- **Gradiente de Secado por Debajo del P.S.F.: [2.5 - 4.5]**
- **Tiempo de Secado del Roble: [700 - 1500] h**

### Definición de Volúmenes de Control para el Modelo Matemático

Para terminar la presente sección, se definen los volúmenes de control que serán usados para plantear las ecuaciones termodinámicas que representan nuestro modelo matemático.

- **Volumen de Control 1:** Volumen de Aire dentro del secador
- **Volumen de Control 2:** Volumen de la madera sin considerar el agua que contiene.

En la figura 27, [12], se observa los volúmenes y superficies de control para el presente trabajo.

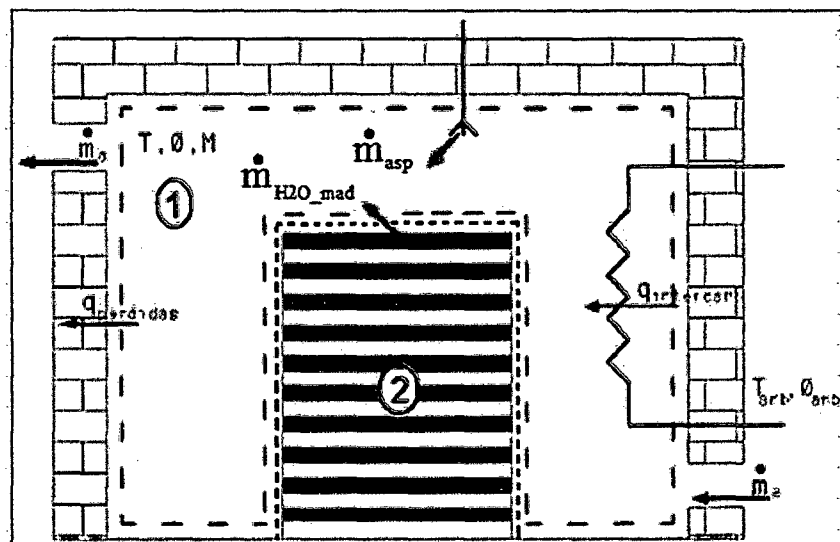


Figura 27. Volúmenes de Control para el análisis termodinámico de la

Cámara de Secado

### **4.3.2 Modelamiento Matemático de la Temperatura del Aire**

Para iniciar con el modelamiento, se debe tener en cuenta las siguientes premisas:

- El vapor saturado que sale de la caldera a 100 PSI pasa por una válvula reductora de presión y reduce dicha presión a 60 PSI manteniendo la temperatura del vapor de forma constante; por tanto, a la salida de la válvula reductora tenemos vapor sobrecalentado.
- El vapor sobrecalentado pasa a través de los radiadores de donde se obtiene líquido saturado.
- La energía por cambio de estado del vapor sobrecalentado dentro del radiador es absorbida por el aire dentro del secador, lo cual aumenta su temperatura y aumenta la tasa de secado de la madera.
- Debido al proceso de secado de la madera, el agua contenida dentro de la madera se evapora y se combina con el aire dentro del secador aumentando así su entalpía. Dado que la presión y volumen dentro del secador se mantiene constante, la temperatura de la nueva mezcla aire húmedo + vapor de agua aumenta.
- Teniendo en cuenta lo mencionado en la premisa anterior, los aspersores del sistema de humidificación vendrían a ser una fuente adicional de calor al aire dentro de la cámara de secado. Sin embargo, si el proceso de humidificación del aire es excesivo puede ocasionar que se condense parte del vapor de agua

lo cual representa una pérdida de calor y, por ende, una disminución en la temperatura.

- Finalmente, se debe tener en cuenta que se pierde calor también en las paredes, el techo y el piso de la cámara de secado.

A partir de todas las premisas mencionadas, podemos comenzar con el modelamiento matemático correspondiente. Para esto, nos valemos de la ecuación (3) en su forma diferencial y aplicada al volumen de control 1, obteniéndose la ecuación (28):

$$m_{wa} C_{p_{wa}} \frac{dT_a}{dt} = q_{rad} + q_{asp} + q_{ww} - q_{we} - q_{aire} - q_{perd} \quad (28)$$

Dónde:

$m_{wa}$ : Masa de Aire Húmedo dentro del secador (Kg)

$C_{p_{wa}}$ : Calor Específico del Aire Húmedo (KJ/Kg°K)

$T_a$ : Temperatura de Bulbo Seco del aire dentro del secador (°K)

$q_{rad}$ : Calor cedido por los radiadores al aire dentro del secador (KJ).

$q_{asp}$ : Calor cedido por los aspersores al aire dentro del secador (KJ).

$q_{aire}$ : Calor cedido por el aire que entra al secador (KJ).

$q_{ww}$ : Calor cedido al aire por el vapor de agua de la Madera (KJ).

$q_{we}$ : Calor de pérdida del aire por el vapor de agua condensado (KJ).

$q_{perd}$ : Calor perdido a través de las paredes, techo, piso y puerta del secador (KJ).

Cabe resaltar que tanto la masa como el calor específico del aire húmedo dentro del secador irán variando a medida que se desarrolle el proceso de secado complicándose así la simulación de dicho modelo; sin embargo, dicho problema se puede resolver considerando las ecuaciones (29) y (30):

$$m_{wa} = (1 + \varepsilon W_a) * m_{da} \quad (29)$$

$$m_{da} = \rho_{da} * V_{da} \quad (30)$$

Dónde:

$m_{da}$  : Masa de Aire Seco dentro de la Cámara de Secado (Kg)

$\rho_{da}$  : Densidad de aire seco ( $\frac{Kg}{m^3}$ )

$V_{da}$  : Volumen de aire seco ( $m^3$ )

$\varepsilon$ : Constante numérica igual a 1.863

$W_a$  : Humedad Específica del aire dentro del secador ( $\frac{Kg_w}{Kg_{da}}$ )

Si combinamos las ecuaciones (29), (30) con las ecuaciones (14), (15) y (28), obtenemos la ecuación (31) que representa el modelo matemático de la temperatura del aire dentro de la cámara de secado:

$$\rho_{da} V_{da} C_p (1 + \varepsilon W_a) \frac{dT_a}{dt} = q_{rad} + q_{asp} + q_{ww} - q_{we} - q_{aire} - q_{perd} \quad (31)$$

Dónde:

$C_{p_{da}}$  : Calor específico de la madera seca (KJ/Kg°K)

Cabe resaltar que la ecuación (31) es simplificada ya que todos sus términos dependen de otros parámetros termodinámicos como la temperatura y se encuentran expresados por las ecuaciones (32) hasta la (39):

$$q_{rad} = \eta * \Delta H * \dot{m}_{cal} \quad (32)$$

$$q_{asp} = \dot{m}_{asp} * (h_g - h_{g_{Ta}}) \quad (33)$$

$$q_{ww} = \dot{m}_{ww} * (h_{g_{Tm}} - h_{g_{Ta}}) \quad (34)$$

$$q_{we} = \dot{m}_{we} * H_{fg_{Ta}} \quad (35)$$

$$q_{aire} = \frac{\dot{m}_a}{1+W_{a_1}} * (h_{a_2} - h_{a_1}) \quad (36)$$

$$q_{perd} = \frac{1}{R} * (T_a - T_{a_1}) \quad (37)$$

$$h_{a_1} = T_{a_1} + W_{a_1}(2501.4 + 1.88T_{a_1}) \quad (38)$$

$$h_{a_2} = T_{a_2} + W_{a_2}(2501.4 + 1.88T_{a_2}) \quad (39)$$

Dónde:

$\dot{m}_{cal}$ : Flujo másico total del vapor de agua de la caldera (Kg/hr)

$\dot{m}_{asp}$ : Flujo Másico de vapor de los aspersores (Kg/hr)

$\dot{m}_{ww}$ : Flujo Másico de vapor proveniente de la madera (Kg/hr)

$\dot{m}_{we}$ : Flujo másico de condensación (Kg/hr)



$h_g$  : Entalpia del vapor proveniente de los aspersores cuyo valor es constante e igual a 2779.0782 (KJ/Kg).

$h_{g_{Ta}}$  : Entalpia del vapor de los aspersores cuando alcanza la temperatura del aire dentro del secador (KJ/Kg).

$h_{g_{Tm}}$  : Entalpia del vapor de los aspersores cuando alcanza la temperatura del aire dentro del secador (KJ/Kg).

$H_{fg_{Ta}}$  : Entalpia de condensación del agua a la temperatura del aire dentro del secador (KJ/Kg).

$\Delta H$  : Entalpía total de condensación del agua dentro del radiador (KJ/Kg) cuyo valor es constante e igual a 2169.2008 KJ/Kg.

$\eta$  : Eficiencia del radiador para transmitir calor cuyo valor es constante e igual a 0.8.

$m_a$  : Flujo másico del aire de entrada al secador (KJ/Kg).

$W_{a_1}$  : Humedad específica del aire dentro del secador en el estado 1 (Kg<sub>ww</sub>/Kg<sub>aa</sub>).

$W_{a_2}$  : Humedad específica del aire dentro del secador en el estado 2 (Kg<sub>ww</sub>/Kg<sub>aa</sub>).

$h_{a_1}$  : Entalpía del aire húmedo en el estado 1 (KJ/Kgda).

$h_{a_2}$  : Entalpía del aire húmedo en el estado 2 (KJ/Kgda).

$R$  : Resistencia térmica de la cámara

### 4.3.3 Modelamiento Matemático de la Humedad Específica del Aire

Para iniciar con el modelamiento, se debe tener en cuenta las siguientes premisas:

- El vapor de agua entregado por los aspersores se combina con el aire húmedo aumentando así el grado de humedad del aire.
- El aire que entra a la cámara de secado lo hace con un cierto grado de humedad lo cual afecta al aire interno de la cámara. Sin embargo, el aire que sale de la cámara de secado lo hace con un grado distinto lo cual ocasiona un gradiente de humedad el cual afecta directamente al aire dentro de la cámara.
- El agua que pierde la madera durante el proceso de secado es absorbida por el aire circundante aumentando así su grado de humedad.
- Cuando el aire se satura, parte del vapor de agua absorbido comienza a condensarse provocando que el grado de humedad disminuya.

A partir de todas las premisas mencionadas, podemos comenzar con el modelamiento matemático correspondiente. Para esto, nos valemos de la ecuación (3) en su forma diferencial y aplicada al volumen de control 1, obteniéndose la ecuación (40):

$$\frac{dm_w}{dt} = \dot{m}_{asp} + \dot{m}_{wa} + \dot{m}_{ww} - \dot{m}_{we} \quad (40)$$

Dónde:

$m_w$ : Masa de agua dentro del volumen de control 1.

$\dot{m}_{wa}$  : Flujo másico de vapor de agua absorbida por el aire dentro del secador.

Si recordamos la definición de humedad específica expresada por la ecuación (9) y lo aplicamos al aire contenido dentro del volumen de control 1, se puede concluir que la humedad específica del aire varía en forma directa con la variación del agua dentro del volumen de control dado que la masa de aire seco se mantiene constante, obteniéndose la ecuación (41):

$$\frac{dm_w}{dt} = M \frac{dW_a}{dt} \quad (41)$$

Además, el flujo másico de vapor de agua absorbido por el aire queda expresado por la ecuación (42):

$$\dot{m}_{wa} = \dot{m}_{\text{estado } 2}^w - \dot{m}_{\text{estado } 1}^w \quad (42)$$

$\dot{m}_{\text{estado } 1}^w$  : Flujo másico de vapor de agua dentro del flujo de aire en el estado 1.

$\dot{m}_{\text{estado } 2}^w$  : Flujo másico de vapor de agua dentro del flujo de aire en el estado 2.

Si aplicamos el concepto de humedad específica al flujo másico de aire y teniendo en cuenta que el flujo másico de aire seco de entrada y de salida es el mismo, se obtiene la ecuación (43):

$$\dot{m}_{wa} = \dot{m}_a \left( \frac{W_a - W_{a,ent}}{1 + W_{a,ent}} \right) \quad (43)$$

Si combinamos las ecuaciones (40), (41) y (43) obtenemos la ecuación (44) que representa el modelo matemático para la Humedad Específica del Aire dentro de la Cámara de Secado.

$$M \frac{dW_a}{dt} = \dot{m}_{asp} + \dot{m}_a \left( \frac{W_a - W_{a,ent}}{1 + W_{a,ent}} \right) + \dot{m}_{ww} - \dot{m}_{we} \quad (44)$$

#### 4.3.4. Modelamiento Matemático de la Presión de Vapor Saturado del Aire Húmedo

En la sección anterior se encontró el modelo matemático correspondiente a la humedad específica del aire dentro de la cámara de secado; sin embargo, dicha ecuación no toma en cuenta la restricción impuesta por la inecuación (13) la cual se aplica a la Humedad Relativa. Se puede demostrar que, aplicando la ecuación (10), la inecuación (13) se puede reescribir como la inecuación (45) y aplicarse a la ecuación (44):

$$0 < W < W_s \quad (45)$$

Dónde:

$W$ : Humedad Específica del Aire Húmedo

$W_s$ : Humedad Específica de Saturación

**Nota:** La Humedad Específica de Saturación viene a ser aquella Humedad que se encuentra asociada a una presión de vapor saturado dada.

Se debe resaltar que la Humedad Específica de Saturación se puede hallar usando la ecuación (10) teniendo como entrada a la presión de vapor saturado; sin embargo, dicha presión se encuentra expresada de forma genérica mediante la ecuación (11) (ecuación de clausius - clapeyron) lo cual no viene a ser de gran ayuda para el modelamiento.

Por tanto, el objetivo de la presente sección es hallar el modelo matemático de la presión de vapor saturado del aire húmedo el cual será usado para la restricción de la inecuación (45). Para esto, acomodamos la ecuación (11) de tal forma que se obtengan las ecuaciones (46) y (47):

$$P_{vs} = e^p \quad (46)$$

$$p = \int_{T_0}^T \frac{\Delta H_v}{R_0 T^2} dT + \ln P_{vs0} \quad (47)$$

Dónde:

$T$ : Temperatura de bulbo seco del aire (°K)

$T_0$ : Temperatura de bulbo seco del aire más bajo del rango de trabajo cuyo valor es igual a 273.15 °K.

$P_{vs}$ : Presión de Vapor Saturado (PSI)

$P_{vs0}$ : Presión de Vapor Saturado para la temperatura  $T_0$  cuyo valor es constante e igual a 0.0886 PSI.

$e$  : Numero de Euler (2.7183).

$\Delta H_v$ : Entalpía de Vaporización del Agua (KJ/Kg).

$R_0$ : Constante Particular del Vapor de Agua cuyo valor es constante e igual a 53.352.

De todas las variables que aparecen en la ecuación (47), solo  $\Delta H_v$  no se conoce; sin embargo, como se mostrará en secciones posteriores,  $\Delta H_v$  viene a estar expresada por una función polinomial de tercer orden con la Temperatura de Bulbo Seco del aire como variable independiente. Teniendo en cuenta esto, la ecuación (47) se convierte en la ecuación (48) que, en conjunto con la ecuación (46), representa el modelo matemático de la presión de vapor saturado del aire húmedo:

$$p = C_1 + \frac{C_2}{T_a} + C_3 * \ln T_a + C_4 * T_a + C_5 * T_a^2 \quad (48)$$

Las constantes de la ecuación (48) se muestran desde (49) hasta (53):

$$C_1 = 181.6796 \quad (49)$$

$$C_2 = -9.6202 * 10^3 \quad (50)$$

$$C_3 = -29.5367 \quad (51)$$

$$C_4 = 7.0856 * 10^{-2} \quad (52)$$

$$C_5 = -3.4398 * 10^{-5} \quad (53)$$

**Nota:**

Para obtener la Humedad Relativa en cualquier instante, simplemente se combinan las ecuaciones (44), (46), (48), (45) y (10). Dicho valor solo se usará para monitoreo durante la simulación.

#### 4.3.5. Modelamiento Matemático de la Temperatura de la Madera

Para iniciar con el modelamiento, se debe tener en cuenta las siguientes premisas:

- El aire que circula sobre la superficie de la madera intercambia calor con esta; por tanto, el aire circundante ocasiona una variación de la temperatura de la madera.
- El agua que sale de la madera en forma de vapor saturado durante el proceso de secado representa una fuente de pérdida de energía; por tanto, el vapor de agua que abandona la madera contribuye en la disminución de la temperatura de la madera.
- Cuando existe condensación de vapor de agua debido a un ambiente saturado, parte de esta cae sobre la madera y otra sobre las paredes y el piso del secador; sin embargo, para el presente trabajo se asumirá que todo el líquido condensado cae sobre la madera lo cual ocasiona una variación en la temperatura de la madera.

Si aplicamos el mismo criterio usado para la Temperatura del Aire pero para el volumen de control 2, se obtiene la ecuación (54) que representa el modelo matemático de la temperatura de la madera:

$$m_{dw} C_p \frac{dT_m}{dt} = \frac{\dot{m}_a}{1+W_{a,ent}} \left( h_{Ta} - h_{Tm} \right) - \dot{m}_{ww} H_{fg} + \dot{m}_{we} \left( h_{Ta} - h_{Tm} \right) \quad (54)$$

Dónde:

$m_{dw}$  : Masa del Roble Seco (Kg).

$C_{p_{dw}}$  : Calor Específico del Roble Seco (KJ/Kg°K).

$T_m$  : Temperatura de la Madera (°K)

$h_{a_{Ta}}$  : Entalpía del Aire Húmedo a la Temperatura del Aire (KJ/Kgda).

$h_{a_{Tm}}$  : Entalpía del Aire a la Temperatura de la Madera (KJ/Kgda).

$H_{fg_{Tm}}$  : Entalpía de Vaporización a la temperatura de la Madera (KJ/Kg).

$h_{f_{Ta}}$  : Entalpía del Agua Líquida Saturada a la Temperatura del Aire (KJ/Kg).

$h_{f_{Tm}}$  : Entalpía del Agua Líquida Saturada a la Temperatura del Aire (KJ/Kg).

#### **4.3.6. Modelamiento Matemático del Flujo Másico de Pérdida de Agua de la Madera**

Se define como flujo másico de pérdida de agua de la madera al vapor saturado de agua que se obtiene de la madera producto del proceso de secado y que es absorbida por el aire circundante dentro de la cámara de secado. Como se observó en secciones anteriores, este término aparece en casi todas los modelos matemáticos hechos hasta el momento y, sin embargo, no se ha tenido hasta el momento una expresión que nos de su valor instantáneo para la simulación. Por tanto, el objetivo de esta sección es hallar su correspondiente modelo matemático.

Como punto de partida, consideramos la ecuación (55), [21]:



$$\frac{\Delta m_{\text{agua ganada por el aire}}(t)}{\Delta t} = P_{\text{agua madera}}(t) - P_{\text{agua madera}}(t-\Delta t) = -\Delta P_{\text{agua madera}}(t) \quad (55)$$

Dividiendo la ecuación (55) entre un diferencial de tiempo, se obtiene la ecuación (56):

$$\frac{\Delta m_{\text{agua ganada por el aire}}(t)}{\Delta t} = -\frac{\Delta P_{\text{agua madera}}(t)}{\Delta t} \quad (56)$$

Aplicando la definición de contenido de humedad en base seca, obtenemos la ecuación (57):

$$\frac{\Delta m_{\text{agua ganada por el aire}}(t)}{\Delta t} = -\frac{P_{\text{madera seca}}}{100} * \frac{\Delta CH(t)}{\Delta t} \quad (57)$$

Aproximando la ecuación (57) mediante diferenciales, obtenemos la ecuación (58) que representa el modelo matemático del flujo másico de pérdida de agua de la madera:

$$m_{ww} = -\frac{P_{\text{madera seca}}}{100} * \frac{d}{dt} CH \quad (58)$$

**Nota:**

- 1) Dado que la variación en el contenido de humedad es muy lento, la rapidez de cambio del contenido de humedad de la madera debe de estar en  $\frac{\%}{h}$ .
- 2) Dicho flujo másico puede ser negativo si la madera comienza a ganar agua debido a un aire de circulación deficiente.

#### 4.3.7. Modelamiento Matemático del Flujo Másico de Ganancia de Agua de la Madera por Aire Saturado

Se define como Flujo Másico de Ganancia a aquel flujo másico de condensado de agua que gana la madera debido a la presencia de un ambiente con aire en saturación. Cabe resaltar que cuando no existe tal condición de saturación, dicho flujo másico es nulo.

Partiendo de dicha premisa, se puede establecer la ecuación (59):

$$\dot{m}_{we} = \left( \frac{m_w - m_{ws}}{T_o} \right) * \mu(m_w - m_{ws}) \quad (59)$$

Dónde:

$m_w$  : Masa de Agua presente en el aire dentro del secador (Kg)

$m_{ws}$  : Masa de Agua de Saturación del aire a una temperatura dada (Kg)

$T_o$  : Tiempo de muestro usado para la simulación (h), donde el valor de este último es igual a 0.01 h.

$\mu$  : Función Escalón expresada mediante la ecuación (60)

$$\mu(m_w - m_{ws}) = \begin{cases} 0 & m_w < m_{ws} \\ 1 & m_w \geq m_{ws} \end{cases} \quad (60)$$

Recordando la definición de Humedad Específica y de lo aplicado en las secciones anteriores, obtenemos la ecuación (61) que representa el modelo matemático para el flujo másico de ganancia de agua:

$$\dot{m}_{we} = \rho_{da} V_{da} * \left( \frac{W - W_s}{T_o} \right) * \mu(W - W_s) \quad (61)$$

#### 4.3.8. Modelamiento Matemático de la Entalpía del Agua en sus Diferentes Fases.

Otro de los términos que aparecen en los modelos matemáticos hallados hasta el momento son las entalpías del agua en sus diferentes fases; por tanto, la presente sección se encargará de hallar el modelo matemático de la entalpía del agua en sus diferentes fases. Para esto, haremos uso de las denominadas “**tablas termodinámicas**” las cuales mantienen un registro de los valores de las entalpías, entropías y otras variables termodinámicas las cuales se encuentran en función de la presión y la temperatura de un determinado elemento.

Para la presente sección, usaremos la tabla termodinámica del agua, la cual se muestra en la tabla 6, [29], partiendo de la premisa que tanto en fase líquida como en vapor el agua permanece en estado saturado.

Presión bar	Temp. °C	Volumen específico m <sup>3</sup> /kg		Energía interna kJ/kg		Entalpía kJ/kg			Entropía kJ/kg·K	
		Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Vapor	Líquido	Vapor
		sat.	sat.	sat.	sat.	sat.	vaporiz.	sat.	sat.	sat.
		$v_f \times 10^3$	$v_g$	$u_f$	$u_g$	$h_f$	$h_g$	$h_g$	$s_f$	$s_g$
0.04	28.96	1.0040	34.800	121.45	2415.2	121.46	2432.9	2554.4	0.4226	8.4746
0.06	36.16	1.0064	23.739	151.53	2425.0	151.53	2415.9	2567.4	0.5210	8.3304
0.08	41.51	1.0084	18.103	173.87	2432.2	173.88	2403.1	2577.0	0.5926	8.2287
0.10	45.81	1.0102	14.674	191.82	2437.9	191.83	2392.8	2584.7	0.6493	8.1502
0.20	60.06	1.0172	7.649	251.38	2456.7	251.40	2358.3	2609.7	0.8320	7.9085
0.30	69.10	1.0223	5.229	289.20	2468.4	289.23	2336.1	2625.3	0.9439	7.7686
0.40	75.87	1.0265	3.993	317.53	2477.0	317.58	2319.2	2636.8	1.0259	7.6700
0.50	81.33	1.0300	3.240	340.44	2483.9	340.49	2305.4	2645.9	1.0910	7.5939
0.60	85.94	1.0331	2.732	359.79	2489.6	359.86	2293.6	2653.5	1.1453	7.5320
0.70	89.95	1.0360	2.365	376.63	2494.5	376.70	2283.3	2660.0	1.1919	7.4797
0.80	93.50	1.0380	2.087	391.58	2498.8	391.66	2274.1	2665.8	1.2329	7.4346
0.90	96.71	1.0410	1.869	405.06	2502.6	405.15	2265.7	2670.9	1.2695	7.3949
1.00	99.63	1.0432	1.694	417.36	2506.1	417.46	2258.0	2675.5	1.3026	7.3594

Tabla 6. Propiedades del agua saturada (líquido-vapor)

Ayudándose del Software Matlab, se encontró la entalpía del líquido saturado, entalpía de vaporización y la entalpía del vapor saturado, las cuales se muestran en las ecuaciones (62), (63) y (64) respectivamente:

$$h_l = 1.0277 \cdot 10^{-5} \cdot T^3 - 1.1098 \cdot 10^{-2} \cdot T^2 + 8.1486 \cdot T - 1.61 \cdot 10^{-3} \quad (62)$$

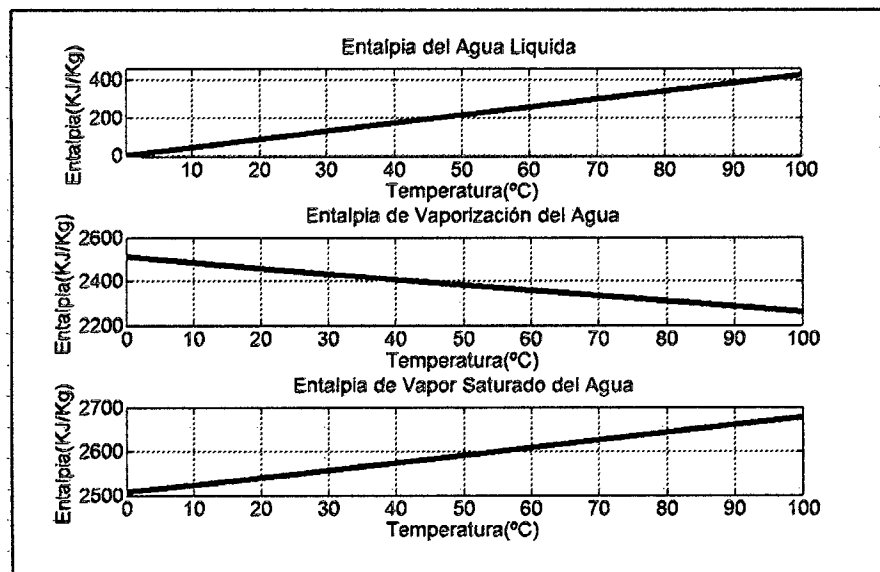
$$\Delta h_{lv} = -3.1749 \cdot 10^{-5} \cdot T^3 + 3.27 \cdot 10^{-2} \cdot T^2 - 13.6312 \cdot T + 4.4397 \cdot 10^3 \quad (63)$$

$$h_v = -2.1477 \cdot 10^{-5} \cdot T^3 + 2.1607 \cdot 10^{-2} \cdot T^2 - 5.4849 \cdot T + 2.8301 \cdot 10^3 \quad (64)$$

Graficamos dichas fórmulas en el rango de 0°C a 100°C, cuyo resultado se muestra en la figura 28.

**Nota:**

La ecuación (63) se usó para hallar el modelo matemático de la presión de vapor saturado del aire húmedo.



**Figura 28. Entalpias de las diferentes Fases del Agua**

#### **4.3.9. Modelamiento Matemático de los Flujos Másicos de Entrada a la Cámara de Secado**

Se debe resaltar que, a partir de lo establecido en la sección 4.1, las entradas a nuestro sistema (Madera + Secador) serán el flujo másico de vapor de la caldera, de los aspersores y del aire; sin embargo, dichas entradas no se pueden controlar directamente sino por medio de válvulas de tipo proporcional. Por tanto, el modelo matemático para los Flujos de Entrada se muestra en la ecuación (65):

$$\dot{m} = K * V \quad (65)$$

Dónde:

$\dot{m}$  : Flujo Másico a controlar (Kg/h)

$V$  : Señal aplicada por el controlador (Voltios)

$K$  : Constante de Proporcionalidad.

#### **4.4. MODELAMIENTO MATEMÁTICO DE LA CINÉTICA DE SECADO DE LA MADERA ROBLE**

En la sección 4.3 nos dedicamos a desarrollar todas las ecuaciones de variables tanto termodinámicas como psicrométricas necesarias para la simulación del proceso de secado; sin embargo, hasta el momento no se ha realizado un modelo matemático que describa el comportamiento de la madera roble ante la presencia de estas variables (Cinética de Secado de la Madera Roble). Por tanto, es objetivo de la presente sección

hallar dicho modelo matemático valiéndonos del Toolbox de **“Identificación de Sistemas”** del Matlab, [16].

#### **4.4.1. Obtención de Datos para la Cinética de Secado**

Para estimar la función de transferencia de un sistema cualquiera valiéndose del **Toolbox de Identificación de Sistemas del Matlab**, [16], se debe de disponer de un conjunto datos de entrada y salida de dicho sistema. Para el caso del modelo matemático de la cinética de secado de la madera roble, se tiene:

- La figura 29 denominada **“Curva de Secado Optimo de la Madera Roble”**, [28], donde se grafican respecto al tiempo:
  - El Contenido de Humedad de la Madera
  - El Contenido de Humedad en Equilibrio
  - La Temperatura del Aire
- La figura 30 denominada **“Curva de Equilibrio Higroscópico”**, [21], donde se grafica respecto a la Temperatura y a la Humedad Relativa del Aire:
  - El Contenido de Humedad en Equilibrio

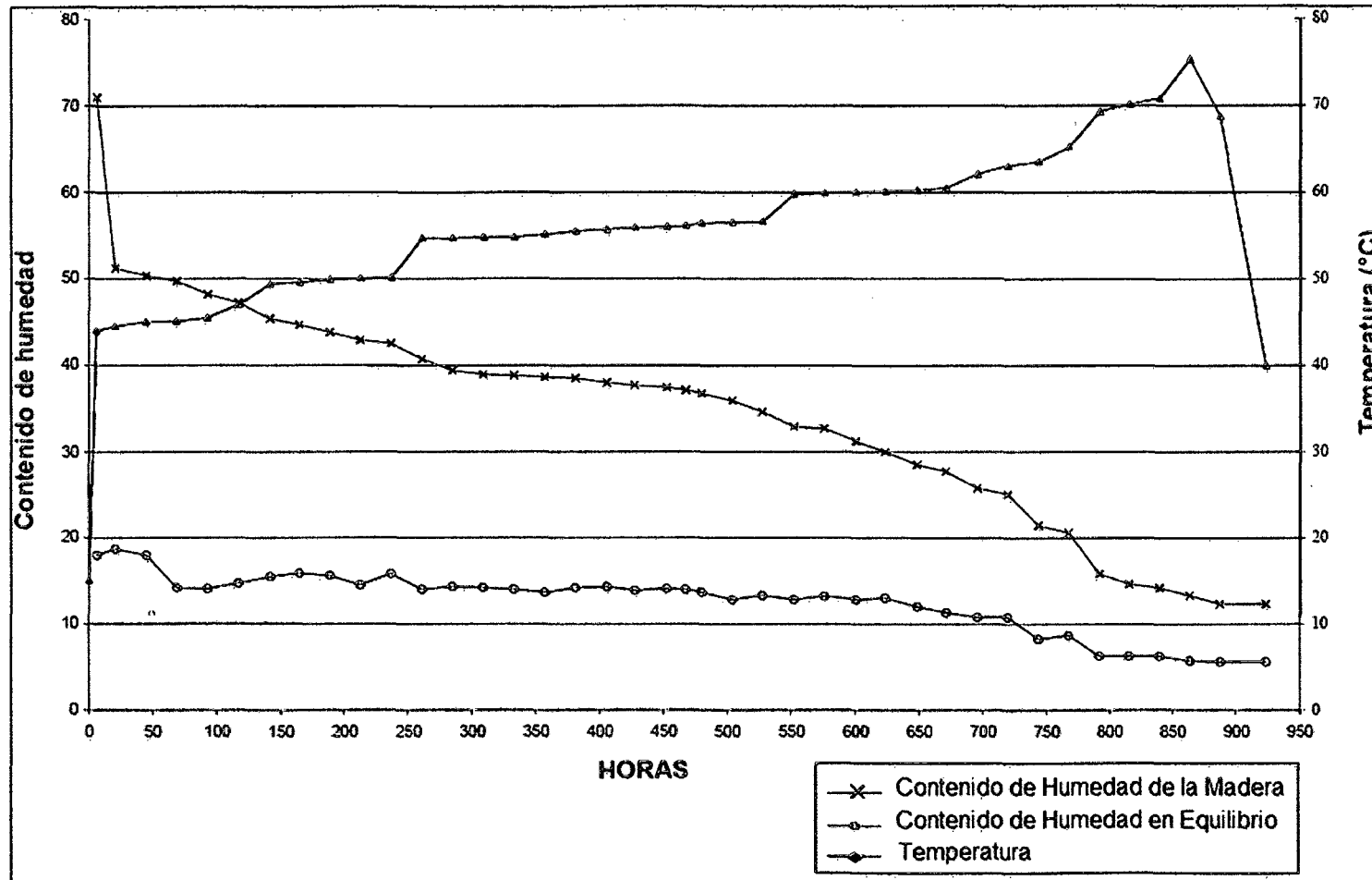


Figura 29. Curva de Secado Optimo para el Roble

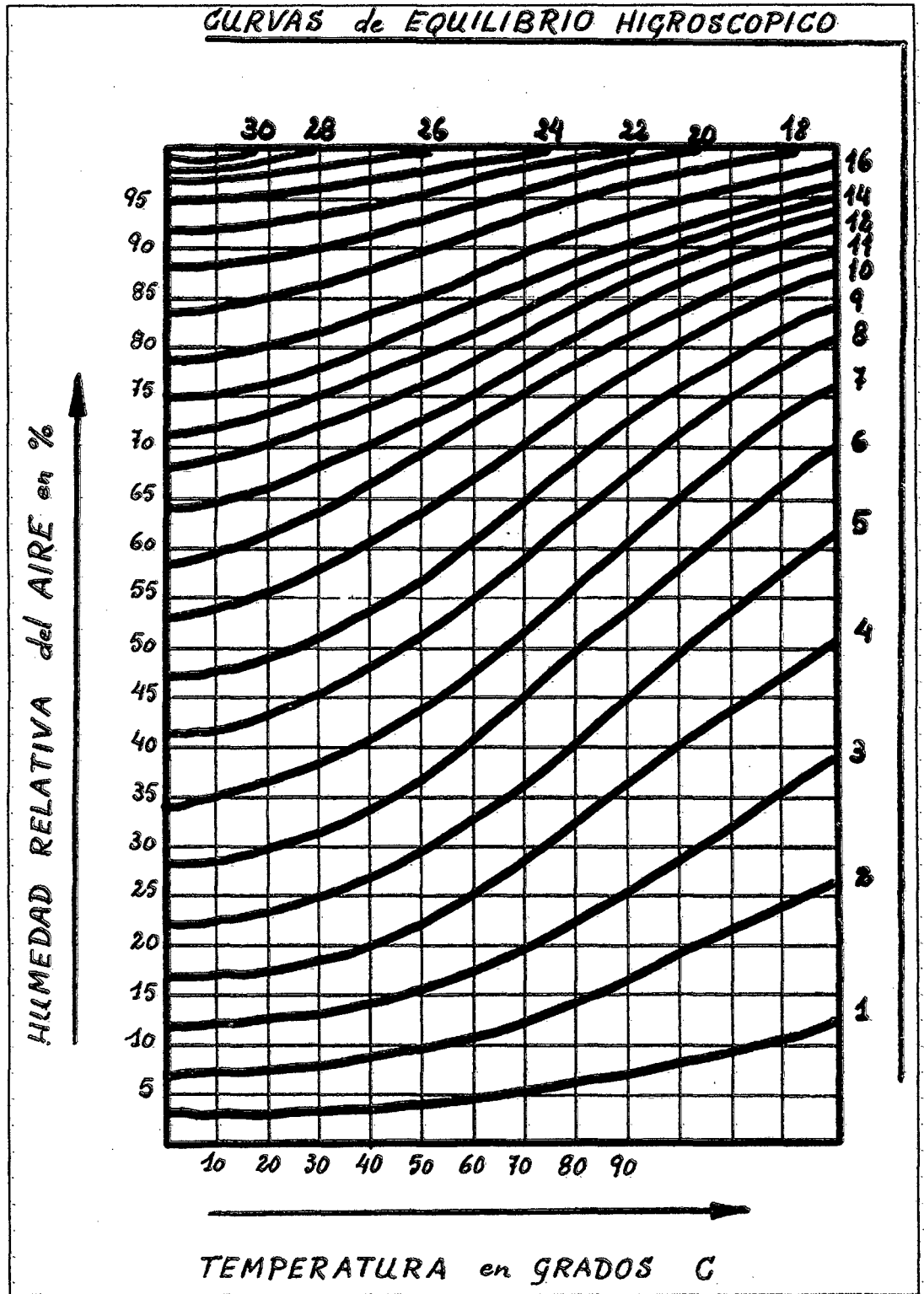


Figura 30. Curva de Equilibrio Higroscópico.



Si combinamos las gráficas de las figuras 29, [28], y 30, [21], se obtienen las siguientes curvas:

- El Contenido de Humedad de la Madera
- El Contenido de Humedad en Equilibrio
- La Temperatura del Aire
- La Humedad Relativa del Aire

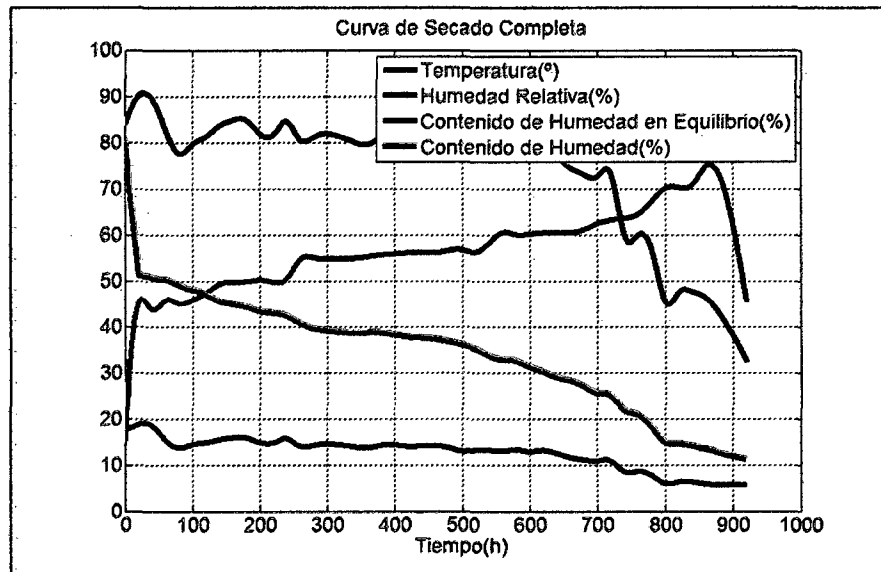
Por tanto, si se desea encontrar un modelo matemático que represente adecuadamente la cinética de secado de la madera, debemos de combinar las gráficas 29 y 30. Para lograr esto, exportamos dichas gráficas al software “**AUTOCAD**” y, valiéndonos de sus diversas funciones, obtenemos las coordenadas de los puntos de cada una de las gráficas.

Como siguiente paso, relacionamos los datos de Contenido de Humedad en Equilibrio y la Temperatura del Aire obtenidas de la figura 29 con los datos de Humedad Relativa del Aire obtenida de la figura 30 para así obtener todas las curvas necesarias para el modelo graficadas respecto al tiempo y, en consecuencia, todas sus coordenadas correspondientes.

Como siguiente paso, convertimos dichas coordenadas en datos numéricos valiéndonos del Software “**DXFACIL**” obteniéndose así un archivo .txt con todos los datos necesarios para el modelo.

Finalmente, exportamos el archivo .txt al software Matlab y confeccionamos sus gráficas correspondientes, las cuales se muestran en la figura 31.

**Nota:** Todas las curvas se grafican respecto al tiempo



**Figura 31. Datos Obtenidos para la Estimación del Modelo**

#### 4.4.2. Planteamiento del Modelo Matemático para el Roble

A partir de lo mencionado en la sección 4.3, se puede plantear que el Contenido de Humedad de la Madera queda expresado por las ecuaciones (66) a la (69):

$$CH = CH_{ww} + CH_{we} \quad (66)$$

$$CH_{ww} = G_{ww} * CHE \quad (67)$$

$$CH_{we} = G_{we} * \Delta W \quad (68)$$

$$\Delta W = W - W_s \quad (69)$$

Dónde:

$CH$  : Contenido de Humedad.

$CHE$  : Contenido de Humedad en Equilibrio.

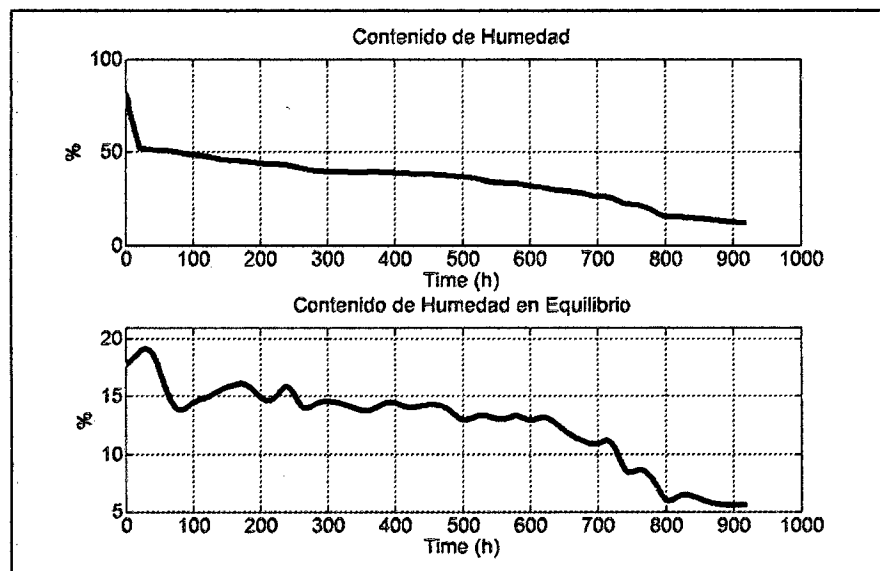
$G_{ww}$  : Función de Transferencia CH-CHE.

$G_{we}$  : Función de Transferencia CH-  $\Delta W$ .

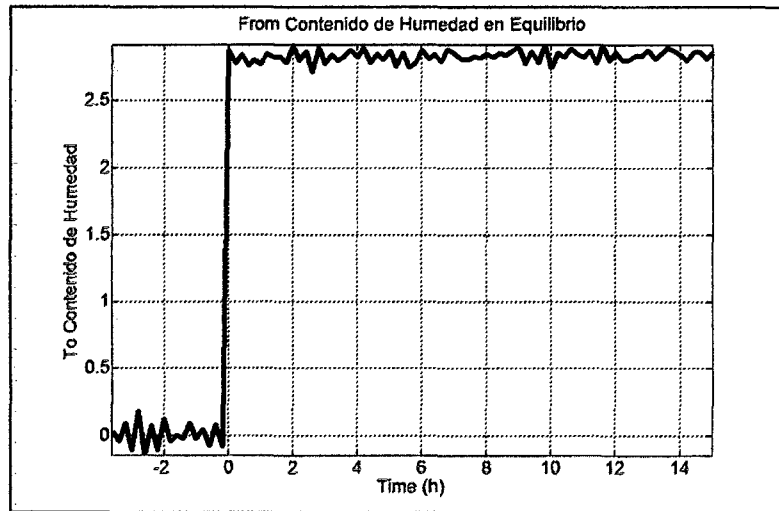
De todas las variables que aparecen en las ecuaciones (66) a (69), se desconocen  $G_{w,w}$ ,  $G_{w,e}$ . CHE. Por tanto, para hallar el modelo matemático de la cinética de secado, se debe determinar primero dichas variables.

### **Función de Transferencia CH - CHE**

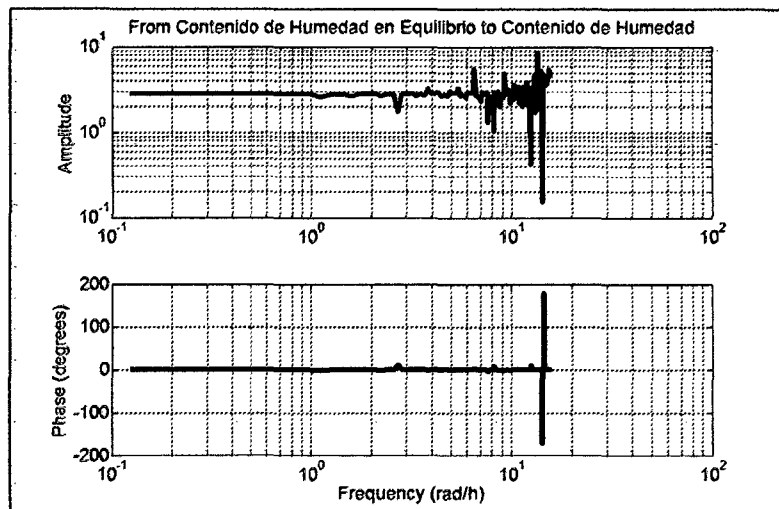
Para hallar la función de transferencia  $G_{w,w}$ , haremos uso del conjunto de datos “**Contenido de Humedad de la Madera - Contenido de Humedad en Equilibrio**” obtenidos en el sección 4.4.1 el cual se procesará con la ayuda del “**Toolbox de Identificación de Sistemas**” del Software Matlab.



**Figura 32. Datos para la Estimación de la Función de Transferencia**



**Figura 33. Respuesta al Escalón**



**Figura 34. Análisis de Bode (Frecuencia)**

En la figura 32, se muestra el uso de dicho Toolbox comenzando con la Selección de los datos de entrada y salida para el sistema. Además, se debe de realizar el análisis tanto en tiempo como en frecuencia del sistema para poder determinar su comportamiento y así asignar un modelo matemático. Dichos

análisis de tiempo y frecuencia se muestran en las figuras 33 y 34 respectivamente.

De ambos gráficos, podemos concluir que existen 3 posibles modelos para el sistema:

- De primer orden
- De segundo orden con polos reales
- De tercer orden con polos reales

Probamos los diferentes modelos hasta encontrar el que mejor se adecue donde se encontró que el modelo más adecuado es un sistema de tercer orden con polos reales dado que el secado de la madera no solo depende del Contenido de Humedad actual sino también de su Rapidez de Secado. En la figura 35 se presentan todos los modelos estimados haciendo uso del “Toolbox de Identificación de Sistemas” del Matlab.

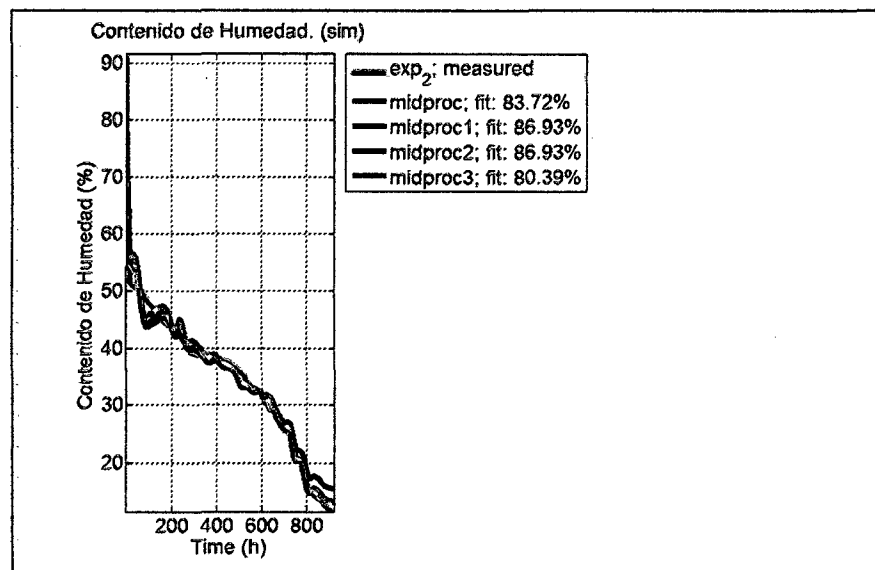


Figura 35. Comparación de Modelos de Tercer Orden

De todos los modelos vistos, el modelo “midproc2” es el que mejor se adecua; por tanto, lo escogeremos como modelo el cual se muestra en la ecuación (70):

$$G_{ww} = \frac{0.1237*s+4.77*10^{-5}}{s^3+0.501*s^2+0.0696*s+5.264*10^{-5}} \quad (70)$$

Pasamos la ecuación (70) a su representación en Espacio – Estado, donde:

- **Entrada:** Contenido de Humedad Higroscópico
- **Variables de Estado:**
  - $x_1$  : Contenido de Humedad de la Madera Roble (%)
  - $x_2$  : Razón de cambio del Contenido de Humedad ( $\frac{\%}{h}$ )
- **Salida:** Contenido de Humedad de la Madera Roble

**Nota:** La variable de Estado  $x_3$  no tiene un significado físico real.

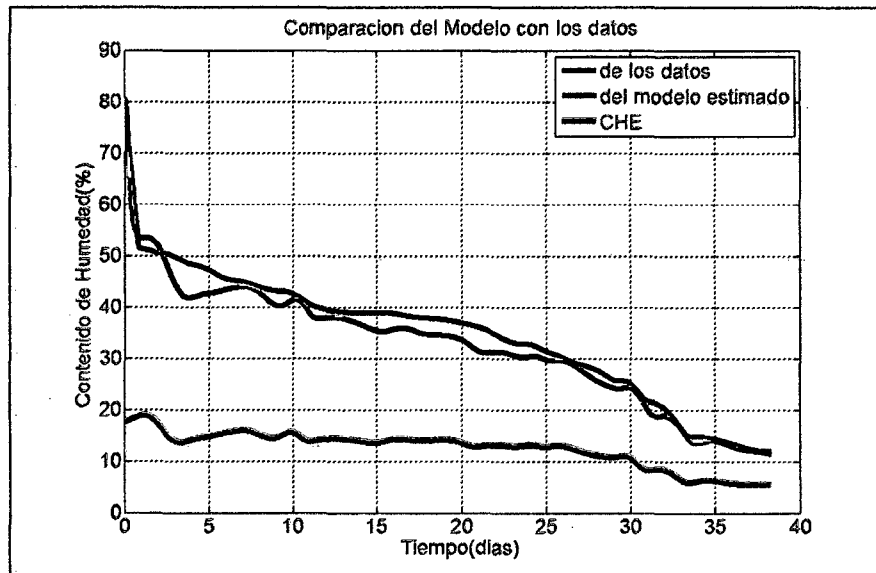
A partir de lo planteado, se obtiene el sistema de matrices y vectores (71) que representa el modelo matemático buscado:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -5.264 * 10^{-5} & -6.296 * 10^{-2} & -0.501 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.1237 \\ -6.1926 * 10^{-2} \end{bmatrix}$$

$$C = [1 \ 0 \ 0] \quad D = [0] \quad (71)$$

Graficamos los resultados obtenidos a partir de dicho modelo en Espacio Estado presentado en la figura 36.



**Figura 36. Modelo Estimado en Espacio Estado**

Observamos que el comportamiento del modelo estimado se aproxima mucho al teórico; sin embargo, para poder afirmar que dicho modelo es el adecuado, es necesario validarlo; es decir, verificar la respuesta de este modelo a nuevos valores de entradas.

Esto último se hace con un juego de valores de entrada y salida; sin embargo, debido a que no se dispone de dicho conjunto de datos, usaremos la gráfica de la figura 37, [22], aplicada al secado natural de la madera roble hasta un Contenido de Humedad del 30% y se comparará con la gráfica de la figura 61 obtenida a partir de simulación.

De la figura 60, teniendo en cuenta que el espesor de las tablas son de aprox. 19 mm (3/4 de pulgadas), obtenemos que el tiempo de secado natural mínimo, promedio y máximo son de 50, 100 y 150 días respectivamente; por tanto el modelo que hemos estimado es válido.

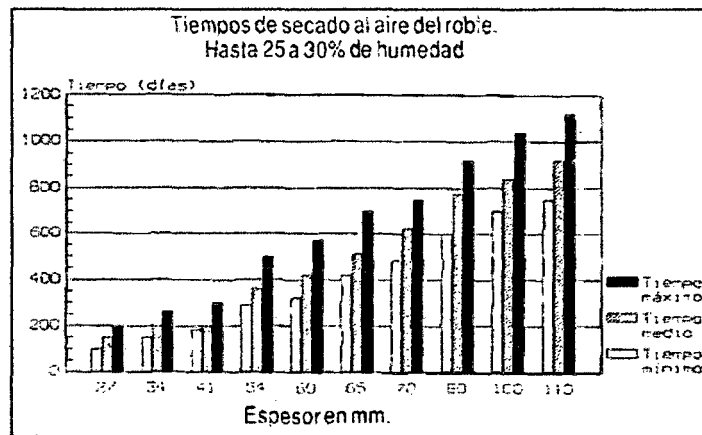


Figura 37. Tiempo de Secado Natural del Roble para diferentes espesores.

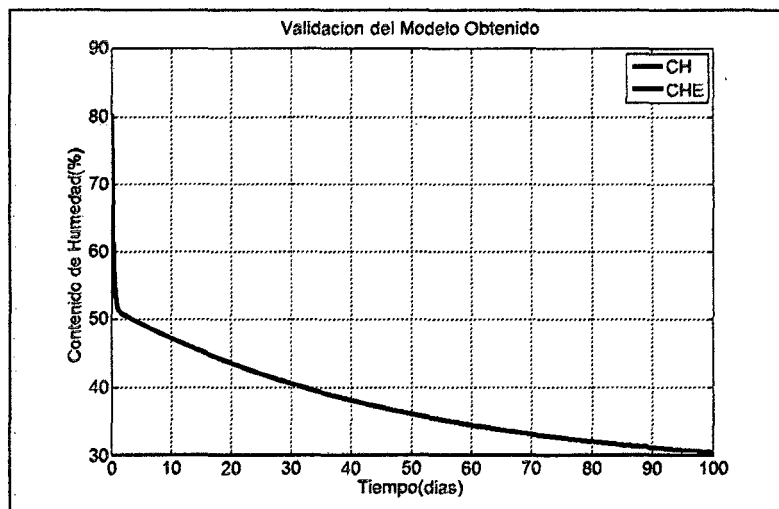


Figura 38. Desarrollo del Secado Natural del Roble según el modelo  
Estimado



### **Función de Transferencia CH - ΔW**

Para hallar la función de transferencia  $G_{we}$ , partimos de la ecuación (72):

$$\Delta m_{we} = \dot{m}_{we} * T_o \quad (72)$$

Dónde:

$\Delta m_{we}$  : Variación de la Masa de Agua de Saturación (Kg)

$\dot{m}_{we}$  : Flujo Másico de Agua de Saturación (Kg/h)

$T_o$  : Tiempo de Muestreo igual a 0.01 h

Si reemplazamos la ecuación (61) en la ecuación (72), obtenemos la ecuación

$$(73): \quad \Delta m_{we} = \rho_{da} * V_{da} * (W - W_s) * \mu(W - W_s) \quad (73)$$

Considerando la ecuación (74):

$$CH_{we} = 100 * \frac{\Delta m_{we}}{P_{mad\ seca}} \quad (74)$$

Reemplazando la ecuación (73) en la ecuación (74), obtenemos la ecuación

(75):

$$CH_{we} = 100 * \frac{\rho_{da} * V_{da}}{P_{mad\ seca}} * \mu(W - W_s) * (W - W_s) \quad (75)$$

De la ecuación anterior, se puede inferir la ecuación (76):

$$CH_{we} = G_{we} * \Delta W \quad (76)$$

De donde obtenemos la ecuación (77) que representa la función de transferencia entre el Contenido de Humedad de la Madera y la cantidad de agua en exceso

en el aire saturado:

$$G_{we} = 100 * \frac{\rho_{da} * V_{da}}{P_{mad\ seca}} * \mu(\Delta W) \quad (77)$$

### Modelamiento del Contenido de Humedad Higroscópica

Como parte final de la sección 4.4.2, necesitamos hallar el último término de la ecuación (67); es decir, el Contenido de Humedad Higroscópica. Para esto, se ha utilizado la Correlación de Simpson, [23], con ciertas modificaciones, de donde se obtuvo las ecuaciones (78) hasta (81):

$$CHE = \frac{1778}{K_3} * \left( \frac{K_1 * K_2 * HR}{1 + K_1 * K_2 * HR} + \frac{K_2 * HR}{1 - K_2 * HR} \right) \quad (78)$$

$$K_1 = 4.737 + 0.0477 * T - 0.00063 * T^2 \quad (79)$$

$$K_2 = 0.7095 + 0.0017 * T - 6.78 * 10^{-6} * T^2 \quad (80)$$

$$K_3 = 223.385 + 0.6492 * T - 0.0185 * T^2 \quad (81)$$

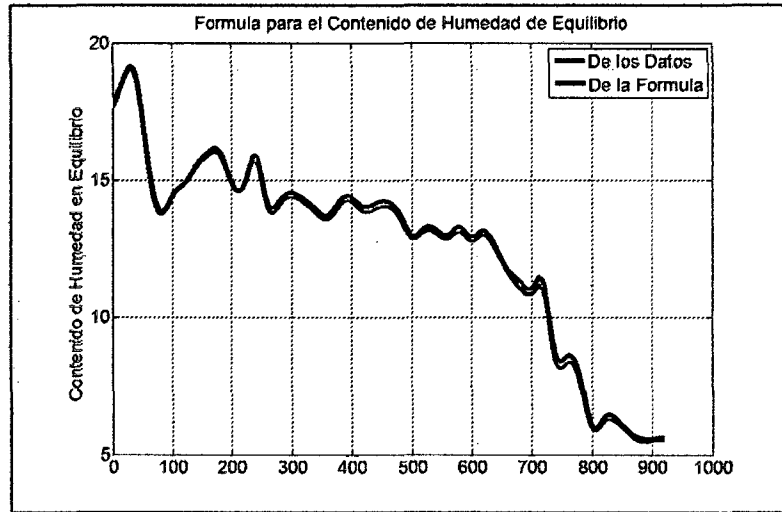
Dónde:

T: Temperatura del Aire (°C)

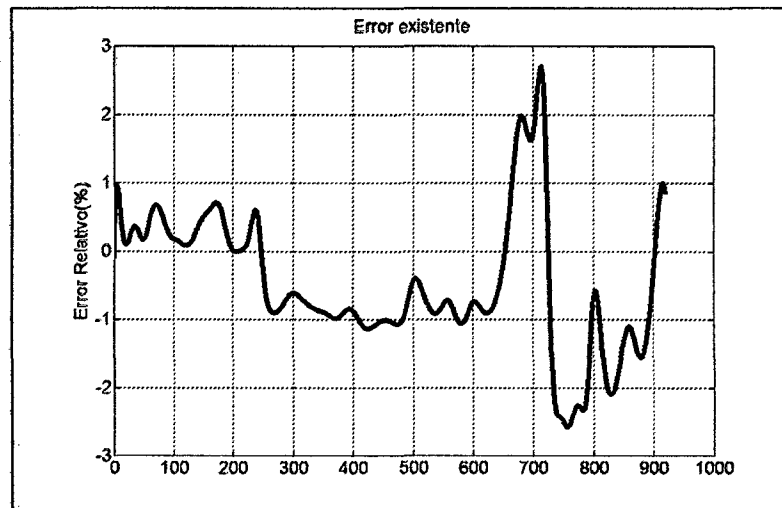
HR: Humedad Relativa del Aire (decimal).

CHE: Contenido de Humedad en Equilibrio (%).

Para validar dicho modelo, nos valemos de los resultados obtenidos en la sección 4.4.1. En la figura 39 se muestra una comparación el modelo obtenido a partir de la correlación de Simpson y los datos experimentales obtenidos y la figura 40 muestra el error relativo (%) obtenido al aplicar dicho modelo.



**Figura 39. Comparación entre el Modelo y los Datos**



**Figura 40. Error Relativo del Modelo Matemático para el CHE.**

#### 4.5. ELABORACIÓN DEL PROGRAMA PARA LA SIMULACIÓN

Tras definir todas las ecuaciones para el sistema Roble - Secador, pasamos a la elaboración de programas para la simulación. Para esto, debemos de tener en cuenta que, para la simulación, importan mucho las condiciones iniciales del

Sistema Roble – Secador. Por tanto, uniremos los modelos matemáticos hallados y los expresaremos en forma de Espacio – Estado, donde:

➤ Entradas:

- $\dot{m}_{cal}$  : Flujo Másico de Vapor de Agua de la Caldera ( $\frac{Kg}{h}$ )
- $\dot{m}_{asp}$  : Flujo Másico de Vapor de Agua de los Aspersores ( $\frac{Kg}{h}$ )
- $\dot{m}_a$  : Flujo Másico de Aire de Entrada ( $\frac{Kg}{h}$ )

➤ Variables de Estado:

- $x_1$  : Temperatura de Bulbo Seco del Aire (°K)
- $x_2$  : Humedad Específica del Aire ( $\frac{Kg_{agua}}{Kg_{aire\ seco}}$ )
- $x_3$  : Contenido de Humedad de la Madera Roble (%)
- $x_4$  : Razón de cambio del Contenido de Humedad ( $\frac{\%}{h}$ )
- $x_6$  : Temperatura de la Madera (°K)

➤ Salida:

- $y$  : Contenido de Humedad de la Madera Roble (%)

**Nota:** La variable de Estado  $x_5$  no tiene un significado físico real.

Acomodando las ecuaciones obtenidas en las secciones anteriores, obtenemos la representación en Espacio – Estado del Sistema Roble + Secador representado por el sistema de ecuaciones diferenciales (82):

$$\frac{dx_1}{dt} = \frac{q_{rad} + q_{asp} + q_{ww} - q_{we} - q_{aire} - q_{perd}}{\rho_{da} V_{da} C_p (1 + \varepsilon x_2)}$$

$$\frac{dx_2}{dt} = \frac{m_{asp} + \dot{m}_a \left( \frac{x_2 - W_a}{1 + W_a} \right) + \dot{m}_{ww} - \dot{m}_{we}}{M}, \quad 0 < W < W_s$$

$$\frac{dx_3}{dt} = x_4$$

$$\frac{dx_4}{dt} = x_5 + 0.1237 * CHE$$

$$\frac{dx_5}{dt} = -5.264 * 10^{-5} * x_3 - 6.296 * 10^{-2} * x_4 - 0.501 * x_5 + 0.1237 * CHE$$

$$\frac{dx_6}{dt} = \frac{\frac{\dot{m}_a}{1 + W_a} \left( h_{Ta} - h_{Tm} \right) - \dot{m}_{ww} H_{fg} + \dot{m}_{we} \left( h_{Ta} - h_{Tm} \right)}{m_{dw} C_{p,dw}}$$

(82)

Consideramos la ecuación (83):

$$\frac{dx_i}{dt} = f_i(u, x) \quad i = 1, 2, \dots, 6 \quad (83)$$

Dónde:

$u$  : Vector de Entrada al Sistema en Espacio – Estado

$x$  : Vector de Variables de Estado del Sistema

Si para la ecuación diferencial (83) aplicamos una aproximación hacia atrás, se obtiene la ecuación (84) para computar el valor de  $x_i$  en cualquier instante:

$$x_{i,k} = f_i(u_k, x_k) * T_0 + x_{i,k-1} \quad (84)$$

Dónde:

: Tiempo de Muestreo para la Simulación (h)

Debido al efecto del flujo másico de agua por saturación, obtenemos las ecuaciones (85) y (86):

$$x_{3k} = x_{3k} + G_{we} * \Delta W_k \tag{85}$$

$$x_{4k} = x_{4k} + G_{we} * \frac{d\Delta W_k}{dt} \tag{86}$$

A partir de las ecuaciones (82) hasta la (86) y considerando las restricciones obtenidas en las secciones 4.3 y 4.4, obtenemos los diagramas de bloques de cada variable de estado del sistema, los cuales se presentan en desde la figura 41 hasta la figura 46. Luego de haber definido todos los bloques correspondientes a cada variable de estado del sistema, pasamos a acoplarlos todos y añadir las funciones faltantes. En la figura 47 se muestran todos los módulos definidos anteriormente en un solo diagramas de bloques.

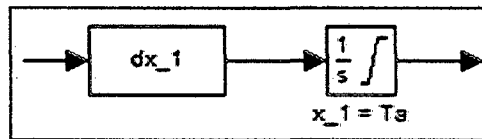


Figura 41. Diagrama de Bloques de la Temperatura del Aire

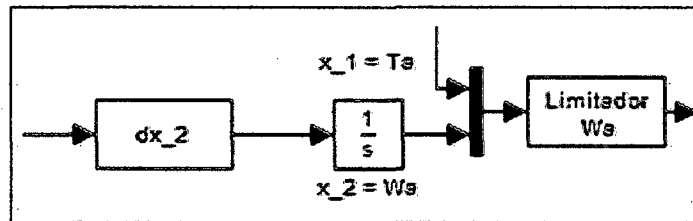


Figura 42. Diagrama de Bloques de la Humedad Específica del Aire

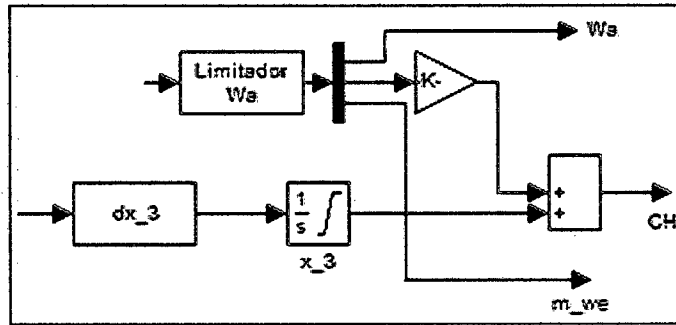


Figura 43. Diagrama de Bloques del Contenido de Humedad del Roble

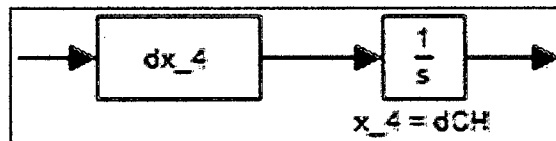


Figura 44. Diagrama de Bloques de la Tasa de Secado de la Madera Roble

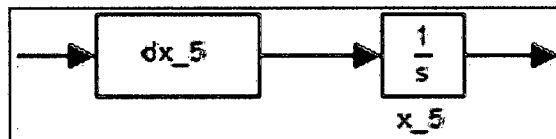


Figura 45. Diagrama de Bloques de la Variable de Estado X5

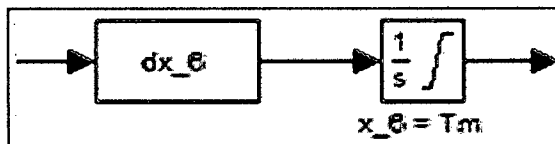


Figura 46. Diagrama de Bloques de la Temperatura de la Madera Roble

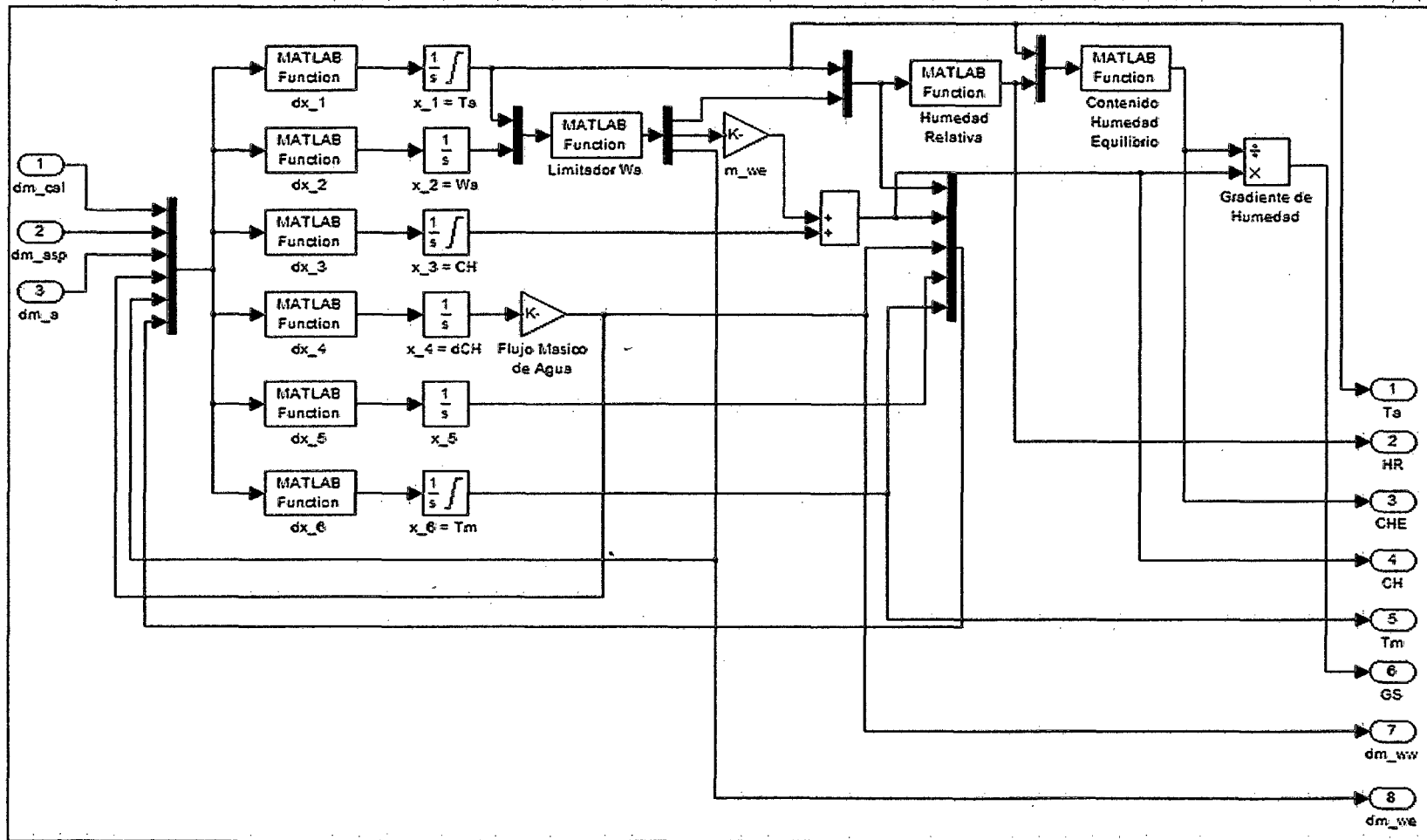


Figura 47. Diagrama de Bloques del Sistema Madera – Secador.



## **CAPITULO 5**

### **DISEÑO DEL ALGORITMO DE CONTROL NEURO-DIFUSO**

El presente capítulo tiene como objetivo diseñar el controlador neuro - difuso para el secador de madera mencionado en capítulos anteriores ayudándose del Toolbox de Lógica Difusa del software Matlab, [8]. Para cumplir dicho objetivo, se hace necesario revisar, de manera resumida, los conceptos de redes neuronales y lógica difusa para poder utilizar adecuadamente el mencionado Toolbox. Además, como se demostrará durante el desarrollo, se hará necesario encontrar un conjunto de datos representativos del sistema a controlar lo cual también será materia del presente capítulo.

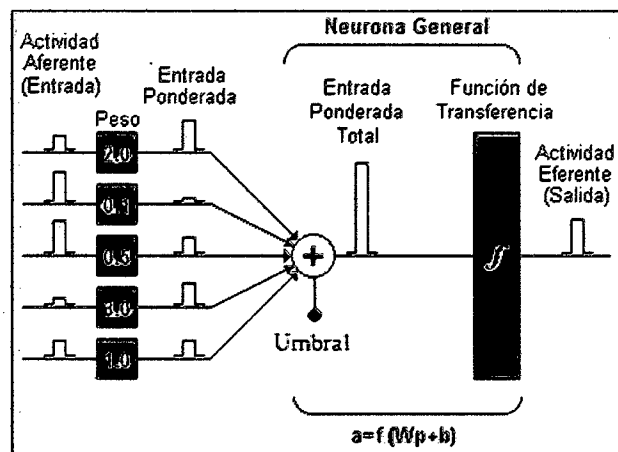
#### **5.1. FUNDAMENTOS DE LAS REDES NEURONALES**

Las redes neuronales son modelos matemáticos que intentan imitar la estructura y funcionamiento del cerebro humano, [4], [3], [10].

Está formada por un conjunto de elementos simples interconectados que son capaces de procesar la información disponible para aprender y así clasificar, predecir, discriminar, etc.; para realizar dicho proceso presenta la siguiente arquitectura:

- Entradas  $X_i$  representan las señales que provienen de otras neuronas y que son capturadas por las dendritas.
- Pesos  $W_i$  son la intensidad de la sinapsis que conecta dos neuronas; tanto  $X_i$  como  $W_i$  son valores reales.
- Un umbral  $b$  que se resta de la suma ponderada entre  $X_i$  y  $W_i$ . No siempre está presente en la Neurona.
- Una función de transferencia  $f$  que se encarga de procesar la señal enviada por los pesos  $W_i$  al procesar las entradas  $X_i$ .

En la figura 48, [10], se muestra, mediante una representación en diagrama de bloques, un ejemplo sobre el funcionamiento de una neurona artificial.



**Figura 48. Representación en Diagrama de Bloques de una neurona artificial.**

Una diferencia esencial entre las redes neuronales y otros modelos matemáticos reside en el proceso de construcción puesto que, en este último, es necesario especificar a priori la función que sigue cualquier proceso que se pretenda

modelar mientras que una red neuronal desarrolla una aproximación a la relación funcional desconocida que liga unas variables con otras, [10]. Para realizar dicha aproximación, se le presenta a la red neuronal, de manera repetitiva y sistemática, una serie de entradas con sus respectivas salidas; a dicho proceso se le denomina “Entrenamiento de la Red”, [4], [10].

### 5.1.1 Neurona Perceptrón

La Neurona Perceptrón es aquel tipo de neurona que se encarga de identificar si un determinado objeto pertenece a uno u otro conjunto realizando la suma ponderada de las entradas, restando el umbral (si existiera) y pasando el resultado a una función de transferencia de tipo escalón, [4], [10].

La regla de decisión es responder +1 si el patrón presentado pertenece a la clase A, o -1 si el patrón pertenece a la clase B, la salida depende de la entrada neta. En la figura 49, [10], se muestra el funcionamiento de un perceptrón simple.

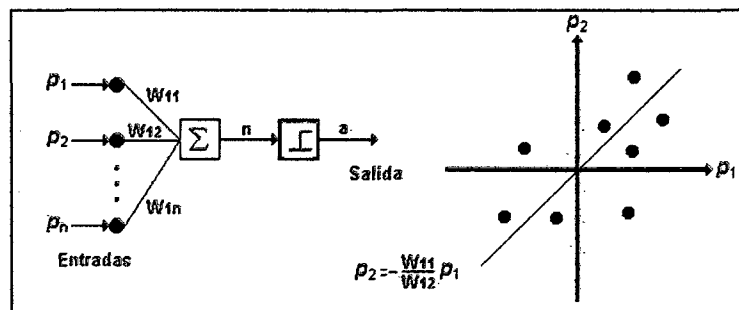


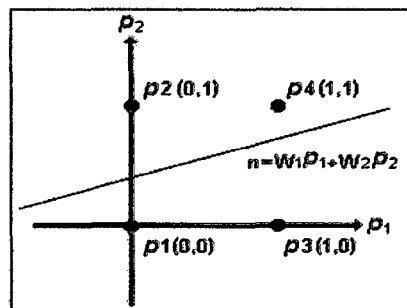
Figura 49. Neurona Perceptrón.

Una técnica utilizada para analizar el comportamiento de neuronas como el Perceptrón es presentar en un mapa las regiones de decisión creadas en el espacio multidimensional de entradas de la red, en estas regiones se visualiza

qué patrones pertenecen a una clase y cuáles a otra, el Perceptrón separa las regiones por un hiperplano cuya ecuación queda determinada por los pesos de las conexiones; en este caso los valores de los pesos pueden fijarse o adaptarse empleando diferentes algoritmos de entrenamiento, [4], [10].

### 5.1.2 Limitación de la Neurona Perceptrón

El Perceptrón, al constar de una sola capa de entrada y otra de salida con una única neurona, sólo es capaz de discriminar patrones muy sencillos, patrones linealmente separables, [4], [10]; esto es, problemas cuyas salidas estén clasificadas en dos categorías diferentes y que permitan que su espacio de entrada sea dividido en estas dos regiones por medio de un hiperplano de características similares a la ecuación del Perceptrón. Se analizará el caso de la compuerta XOR, el cual no es un problema linealmente separable, que se observa en la figura 50, [10].



**Figura 50. Mapeo de la Función XOR usando un Perceptrón Simple.**

Se observa que con un perceptrón simple no se resuelve todos los problemas que se requieren; por esta razón, surge la neurona denominada “**Perceptrón Multicapa**”, [4], [10].

### 5.1.3 Perceptrón multicapa

Un Perceptrón multicapa es una red con alimentación hacia delante, compuesta de varias capas de neuronas entre la entrada y la salida de la misma permitiendo establecer regiones de decisión mucho más complejas que las de dos semiplanos, como lo hace el Perceptrón de un solo nivel, [4], [10].

En la figura 51, [10], se muestra el esquema de una red Perceptrón multicapa y en la figura 52, [10], se muestra la forma en cómo clasifica correctamente los patrones de la compuerta XOR.

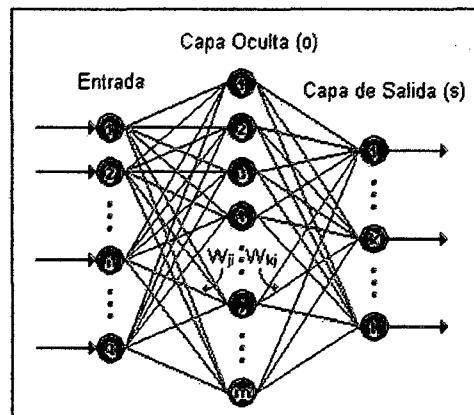


Figura 51. Perceptrón Multicapa

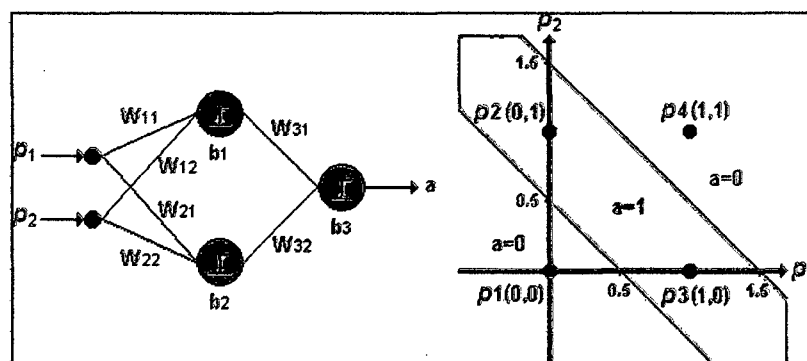


Figura 52. Perceptrón Multicapa aplicado al XOR

Algunas ventajas de las redes neuronales artificiales frente a otros sistemas de procesamiento de información, [10]:

- Las redes neuronales artificiales pueden sintetizar algoritmos a través de un proceso de aprendizaje.
- Tiempo de ejecución muy rápido.
- Para utilizar la tecnología neuronal no es necesario conocer detalles matemáticos. Sólo se requiere estar familiarizados con los datos de trabajo.
- La solución de problemas no lineales es uno de los fuertes de las redes neuronales artificiales
- Las redes son robustas, pueden fallar algunos elementos de procesamiento pero la red continúa trabajando, esto es contrario a lo que sucede en programación tradicional.
- Pueden agregar o retirar fácilmente variables de entrada.
- Son poco sensibles al ruido.

Algunas de las desventajas de las redes neuronales artificiales son, [10]:

- Las redes neuronales artificiales deben de entrenar para cada problema. Además es necesario realizar múltiples pruebas para determinar la arquitectura adecuada. El entrenamiento es largo y puede consumir bastante tiempo de procesamiento de datos en el CPU.
- Debido a que las redes se entrenan en lugar de programarlas, estas necesitan muchos datos.

## 5.2. FUNDAMENTOS DE LA LÓGICA DIFUSA

La lógica difusa busca modelar como una persona toma decisiones basada en información con las características mencionadas diferenciándose de la lógica convencional, que trabaja con información bien definida y precisa, [13], [3], [8]. Cabe resaltar que la aplicación más resaltante de la lógica difusa es en el control de diversos sistemas, el cual es tema de la presente sección.

### 5.2.1. Control con Lógica Difusa

Los controladores convencionales son derivados de las técnicas de la teoría de control basados en modelos matemáticos de procesos de lazo abierto, llamados sistemas de control. El propósito del controlador realimentado es que garantice la respuesta deseada en la salida  $y$ . El controlador hace que la salida  $y$  se aproxime a la entrada de referencia  $r$  mediante la acción de control  $u$ , a pesar de las perturbaciones ante la presencia de los parámetros del sistema y medidas del ruido, llamado regulación.

El trabajo realizado por Lofti Zadeh en los algoritmos difusos introduce la idea de formular el algoritmo de control con reglas difusas. En un controlador de lógica difusa, la conducta dinámica de un sistema es caracterizado por la descripción de un conjunto de reglas lingüísticas basado en el conocimiento del experto, normalmente en la forma:

**IF** antecedente **THEN** consecuente

Donde el **antecedente** es el conjunto de condiciones a ser satisfechas y **consecuente** es el conjunto de condiciones que pueden inferirse. Entonces, los antecedentes y consecuentes son reglas **IF-THEN** asociados con los conceptos

difusos (términos lingüísticos) donde estas son llamadas frecuentemente **declaraciones condicionales difusas**.

Básicamente, las reglas de control difusas mantienen una manera conveniente de expresar un control basado en el conocimiento. Además, varias variables lingüísticas podrían ser involucradas en los antecedentes y consecuentes mediante reglas tal y como se muestra en la figura 76.

Regla 1	:	IF x es $A_1$ AND y es $B_1$ THEN z es $C_1$
también		
Regla 2	:	IF x es $A_2$ AND y es $B_2$ THEN z es $C_2$
también		
...		...
también		
Regla n	:	IF x es $A_n$ AND y es $B_n$ THEN z es $C_n$

**Figura 53. Ejemplo de Reglas Difusas.**

Donde  $x$  e  $y$  son las variables de estado del proceso,  $z$  es la variable de control.  $A_i$ ,  $B_i$  y  $C_i$  son los valores lingüísticos de las variables lingüísticas  $x$ ,  $y$ ,  $z$  en los universos discursos  $U$ ,  $V$ ,  $W$  respectivamente, y una frase implícita conjuntiva en los conectivos de las reglas.

Un controlador difuso típico describe la relación entre el cambio de control ( $\Delta u$ ) y el cambio del error ( $\Delta e$ ) mediante el sistema de ecuaciones (87):

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k - 1) \quad (87)$$

$$\Delta e(k) = e(k) - e(k - 1)$$

Para poder determinar nuestro sistema de Control Difuso, haremos uso del Toolbox de Lógica Difusa del Matlab, [8]. Para dicho Toolbox, existen cinco partes del proceso de inferencia difusa:



1. **Fuzzificación de las variables de entrada:** Toma las entradas al sistema de control y las traslada al espacio difuso valiéndose de tablas o de alguna función.
2. **Aplicación del Operador Difuso:** Si el antecedente de una regla dada tiene más de una sentencia, se aplica el operador difuso para obtener un número que representa el resultado del antecedente para cada regla. Entonces, este número será aplicado a la función de salida.
3. **Implicación del antecedente al consecuente:** Un consecuente es un arreglo difuso representado por una función de membresía el cual pesa apropiadamente las características lingüísticas que se les atribuye. La entrada para cada proceso de implicación es un solo número dado por el antecedente y la salida es un arreglo difuso; dicho proceso se aplica a cada regla.
4. **Agregación de los consecuentes de cada regla:** La agregación es el proceso en el cual los arreglos difusos que representan las salidas de cada regla son combinados en un solo arreglo difuso. La salida del proceso de agregación es un arreglo difuso para cada variable de salida.
5. **Defuzzificación:** La entrada para el proceso de defuzzificación es un arreglo difuso y la salida es un número. Quizás el método más popular es el cálculo del centroide el cual devuelve el centro del área bajo la curva.

### 5.2.2 Métodos de Inferencia Difusa

Como se mencionó anteriormente, los sistemas de inferencia difusa se encargan de calcular las salidas a partir de las entradas; a continuación, pasaremos a describir dos de los métodos más usados, [13], [8]:

#### Método de Inferencia Difusa de Mandami

Posee la arquitectura mostrada en la figura 77:

Regla 1	:	IF x es $A_1$ AND y es $B_1$ THEN z es $C_1$
también	:	
Regla 2	:	IF x es $A_2$ AND y es $B_2$ THEN z es $C_2$
hecho	:	x es $x_0$ AND y es $y_0$
consecuente	:	z es C

Figura 54. Estructura de Reglas de Tipo Mandami

Las implicaciones difusas del modelo por el operador mínimo de Mandami y la sentencia conectiva se interpreta como la proposición y definida por el operador máximo. Los niveles de activación de las reglas denotados por  $\alpha_i$  ( $i = 1, 2$ ) son computados por el sistema de ecuaciones (88):

$$\begin{aligned}\alpha_1 &= A_1(x_0) \cap B_1(y_0) \\ \alpha_2 &= A_2(x_0) \cap B_2(y_0)\end{aligned}\quad (88)$$

Las reglas de salida se obtienen mediante el sistema de ecuaciones (89):

$$\begin{aligned}C'_1(\omega) &= \alpha_1 \cap C_1(\omega) \\ C'_2(\omega) &= \alpha_2 \cap C_2(\omega)\end{aligned}\quad (89)$$

La salida del sistema global se computa por las reglas de salidas mediante la

$$\text{ecuación (90):} \quad C(\omega) = C'_1(\omega) \cup C'_2(\omega)\quad (90)$$

Finalmente, se obtiene la acción de control para nuestro sistema, previo paso de defuzzificación para ser usado.

### Método de Inferencia Difusa Takagi - Sugeno

Sugeno y Takagi usaron la arquitectura mostrada en la figura 55.

Regla 1 también	:	IF x es $A_1$ AND y es $B_1$ THEN $z_1 = a_1x + b_1y$
Regla 2 hecho	:	IF x es $A_2$ AND y es $B_2$ THEN $z_2 = a_2x + b_2y$
consecuente	:	$x$ es $x_0$ AND y es $y_0$
	:	$z_0$

Figura 55. Estructura de Reglas de Tipo Takagi Sugeno

La activación de reglas es computada por el sistema de ecuaciones (91):

$$\begin{aligned}\alpha_1 &= A_1(x_0) \cap B_1(y_0) \\ \alpha_2 &= A_2(x_0) \cap B_2(y_0)\end{aligned}\quad (91)$$

Entonces, la regla de salida individual es derivada del sistema de ecuaciones (92):

$$\begin{aligned}z_1^* &= a_1x_0 + b_1y_0 \\ z_2^* &= a_2x_0 + b_2y_0\end{aligned}\quad (92)$$

La acción de control crisp está dada por la ecuación (93):

$$z_0 = \frac{\alpha_1 z_1^* + \alpha_2 z_2^*}{\alpha_1 + \alpha_2}\quad (93)$$

Si tenemos reglas en nuestra base de reglas, la acción de control crisp es computada por la ecuación (94):

$$z_0 = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i z_i^*}{\sum_{i=1}^n \alpha_i}\quad (94)$$

Donde  $\alpha_i$  denota el nivel de activación de la  $i$ -ésima regla ( $i = 1, 2, \dots, n$ ).

### 5.3. OBTENCIÓN DE DATOS DE LA PLANTA A CONTROLAR

Como se mencionó, el objetivo del presente capítulo es diseñar el algoritmo de control para la planta (secador + madera); sin embargo, para realizar dicho diseño, se debe de conocer a priori el comportamiento de dicha planta ante la presencia de determinadas entradas.

La forma más usada para conocer dicho comportamiento, la cual fue usada para el presente trabajo, consiste en excitar a la planta con diversos patrones de entrada y observar los valores de salida obtenidos hasta encontrar el **“resultado óptimo”** de acuerdo a los valores deseados para el proceso (el proceso de excitación y obtención de datos se denominará, para el presente trabajo, como **“Experimento”**).

Además, se presentan resultados adicionales relacionados al comportamiento termodinámico y psicrometrico del aire dentro de la cámara de secado, los cuales tratan de respaldar los valores de salida obtenidos en cada experimento; dichos gráficos, para el presente trabajo, se denominarán **“Resultados de Respaldo”**.

#### 5.3.1. Obtención de Datos de Entrada y Salida Óptimos para el Proceso de Secado

Para la obtención de datos de entrada y salida correspondientes al proceso de secado **“óptimo”**, se realizaron muchos experimentos; sin embargo, para el presente trabajo, solo se presentan los 5 experimentos más resaltantes:

- **Experimento 1:**  $\dot{m}_{cal} = 0$     $\dot{m}_{asp} = 0$     $\dot{m}_a = 0$
- **Experimento 2:**  $\dot{m}_{cal} = 0$     $\dot{m}_{asp} = 0$     $\dot{m}_a = 5 * 10^3$
- **Experimento 3:**  $\dot{m}_{cal} = 1.9 * 10^2$     $\dot{m}_{asp} = 0$     $\dot{m}_a = 1.3 * 10^4$
- **Experimento 4:**  $\dot{m}_{cal} = 1.9 * 10^2$     $\dot{m}_{asp} = 1.7 * 10^1$     $\dot{m}_a = 1.3 * 10^4$
- **Experimento 5:** Combinación de los Anteriores Experimentos

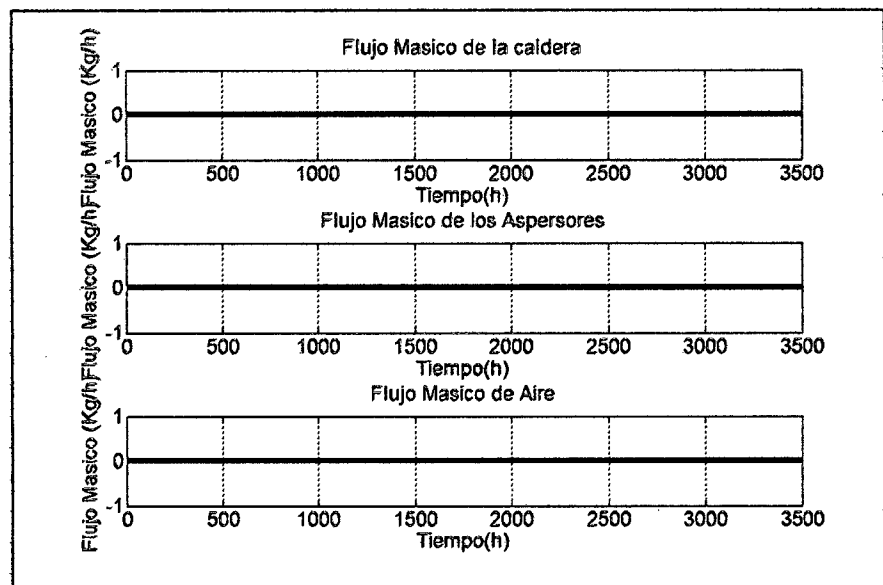
Cada experimento, para el presente trabajo, consta de la siguiente estructura:

- **Entradas:**
  - Flujo Másico de Vapor Saturado de la Caldera
  - Flujo Másico de Vapor Saturado de los Aspersores
  - Flujo Másico del Aire de Entrada a la Cámara de Secado
- **Salidas:**
  - Contenido de Humedad en Base Seca de la Madera
  - Flujo Másico de Pérdida de Humedad de la Madera
  - Gradiente de Secado de la Madera
- **Respaldo:**
  - Temperatura de Bulbo Seco del Aire
  - Humedad Relativa del Aire
  - Flujo Másico de Agua por Saturación

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en cada experimento en conjunto con la explicación de cada resultado.

### Experimento 1

Como punto de partida, no se aplicaran flujos másicos a la cámara de secado (figura 56) lo que equivale a dejar que la pila de roble interactúe con el aire interno y sin acondicionar de la cámara.



**Figura 56. Flujos de Entrada al Secador**

Al aplicar las entradas mostradas en la figura 56, se obtienen los resultados mostrados desde la figura 57 hasta la 59.

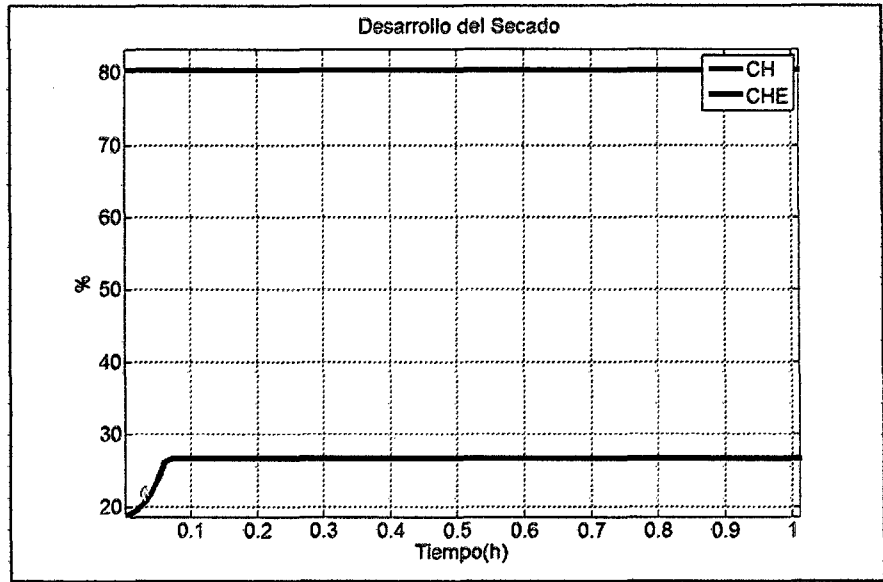


Figura 57. Contenido de Humedad de la Madera y en Equilibrio.

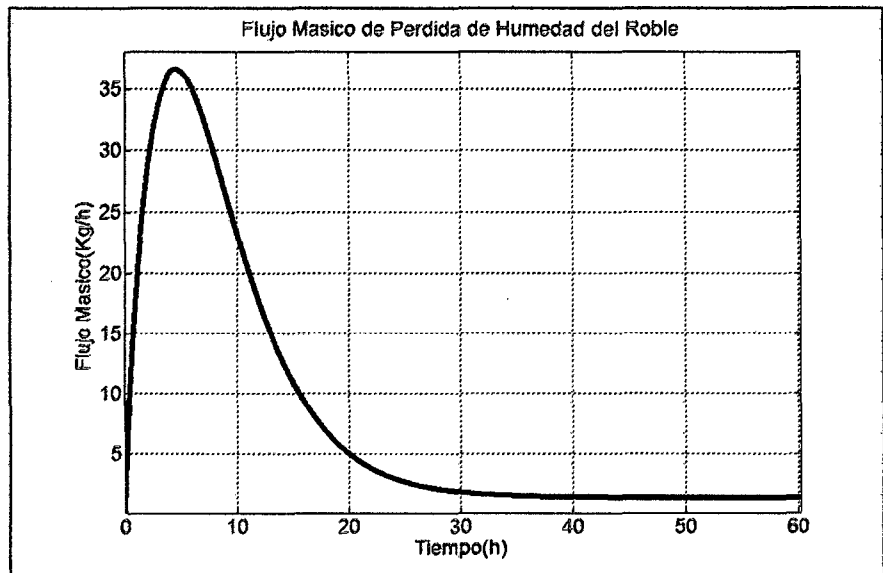
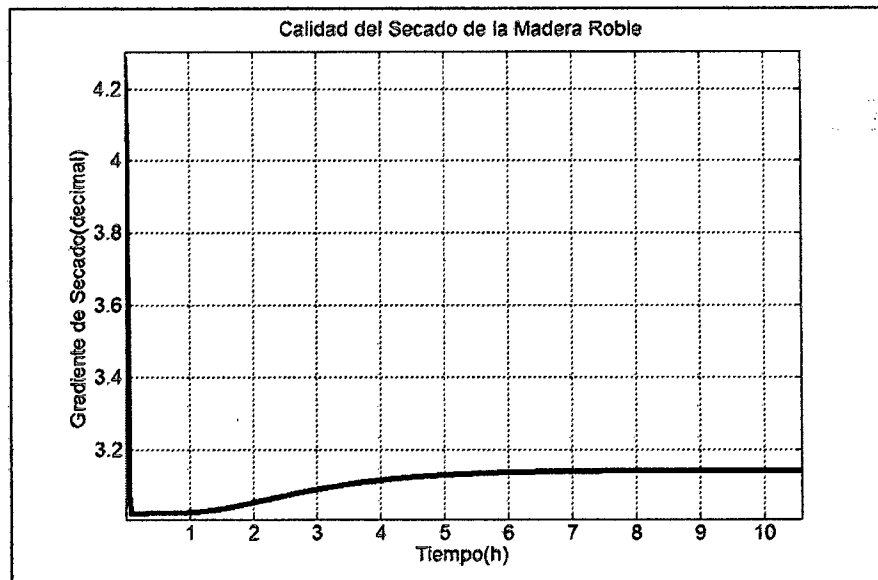


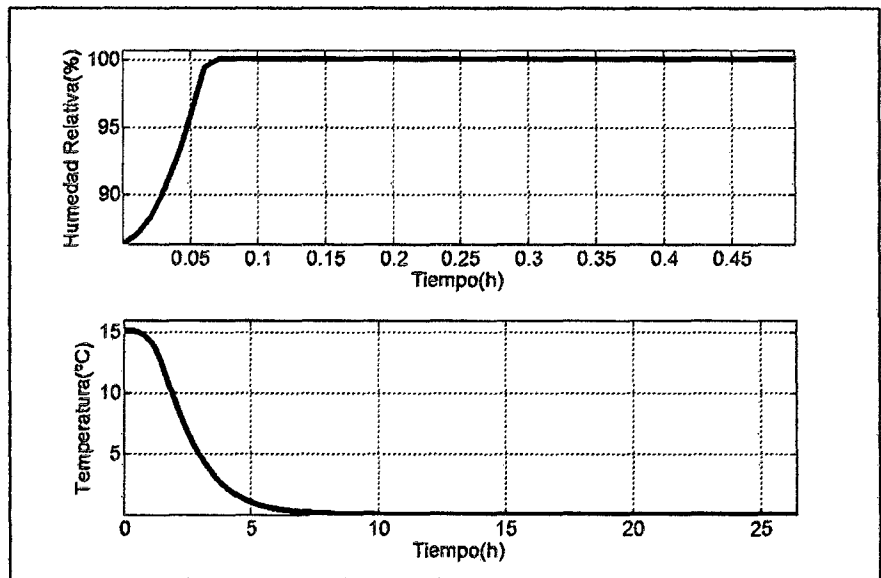
Figura 58. Flujo Másico de Pérdida de Humedad del Roble



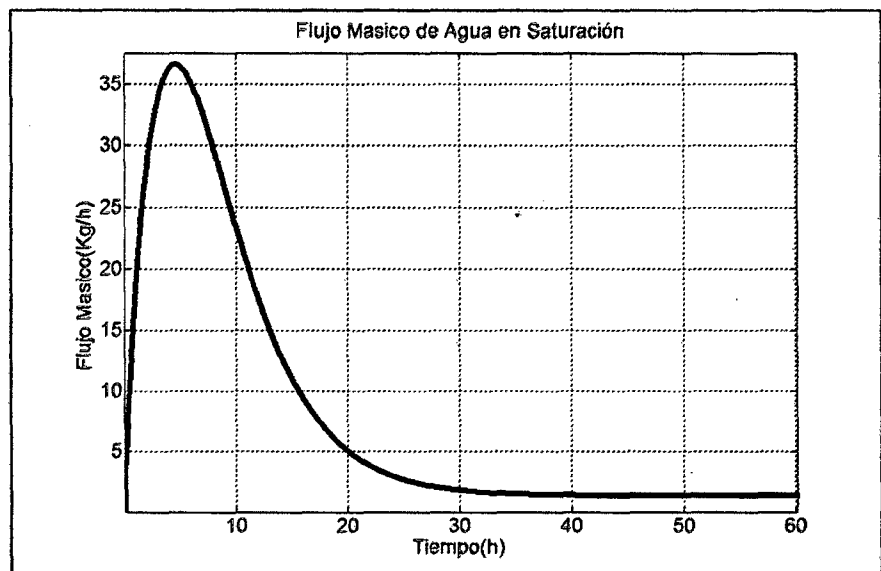
**Figura 59. Gradiente de Secado**

Se puede observar de la figura 57 que, aunque existe un flujo másico de pérdida de humedad (fig. 59) y el gradiente de secado se encuentra en el rango establecido al inicio del capítulo 4 (fig. 59), el contenido de humedad del roble se mantiene invariable durante todo el proceso. En las figuras 60 y 61, se presentan los resultados de respaldo que servirán para explicar el porqué de este fenómeno.





**Figura 60. Condiciones Psicrométricas del Aire dentro de la Cámara de Secado**



**Figura 61. Flujo Másico de Agua por Saturación**

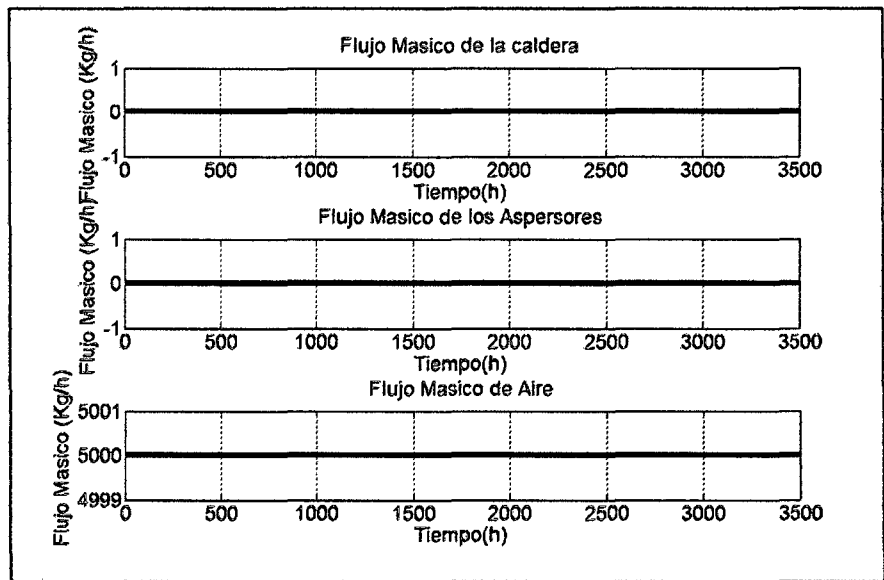
En la figura 61, se observa que el Flujo Másico de Agua por Saturación es idéntico al Flujo Másico de Pérdida de Humedad de la figura 58 lo cual ocasiona que el Contenido de Humedad permanezca constante. Además, de la

figura 60, se observa que la temperatura del aire dentro de la cámara de secado comienza a disminuir drásticamente debido al calor que absorbe la madera para eliminar su humedad. Esto ocasiona que la Humedad Relativa del Aire dentro de la cámara aumente hasta su valor máximo de forma casi inmediata generando así el Flujo Másico por Saturación ya mencionado.

Por tanto, la no aplicación de Flujos Másicos de Entrada a la cámara no genera ningún cambio en el Contenido de Humedad del Roble debido a las condiciones de saturación que se generan dentro de la cámara.

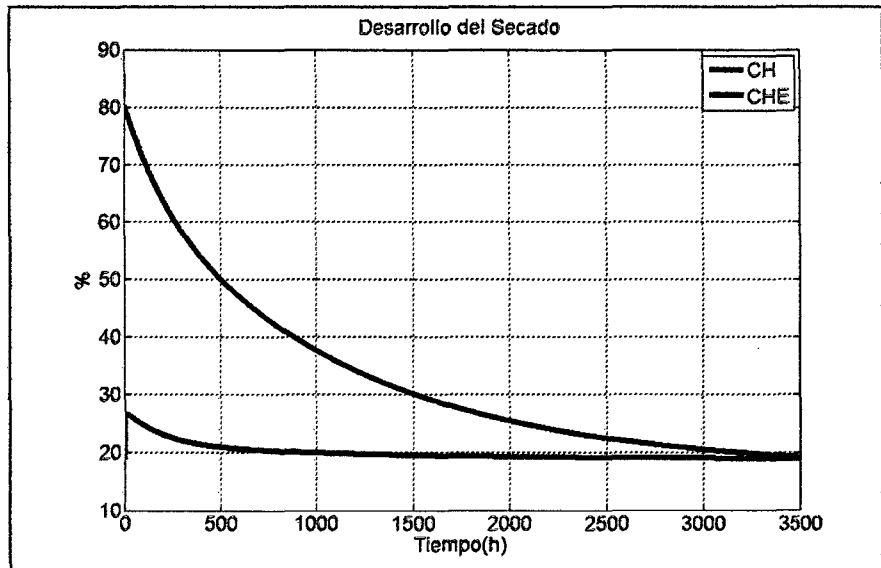
## **Experimento 2**

Como se demostró en el experimento 1, la no aplicación de flujos másicos de entrada a la cámara de secado genera flujos de pérdida de humedad y de agua por saturación en total equilibrio, generando así un contenido de humedad invariable; sin embargo, dicho equilibrio se puede romper si parte del flujo másico de agua por saturación es expulsado de la cámara, lo cual solo se puede lograr por la existencia de un flujo másico de aire dentro de la cámara donde dicho flujo másico muestra en la figura 62 junto a las otras entradas.

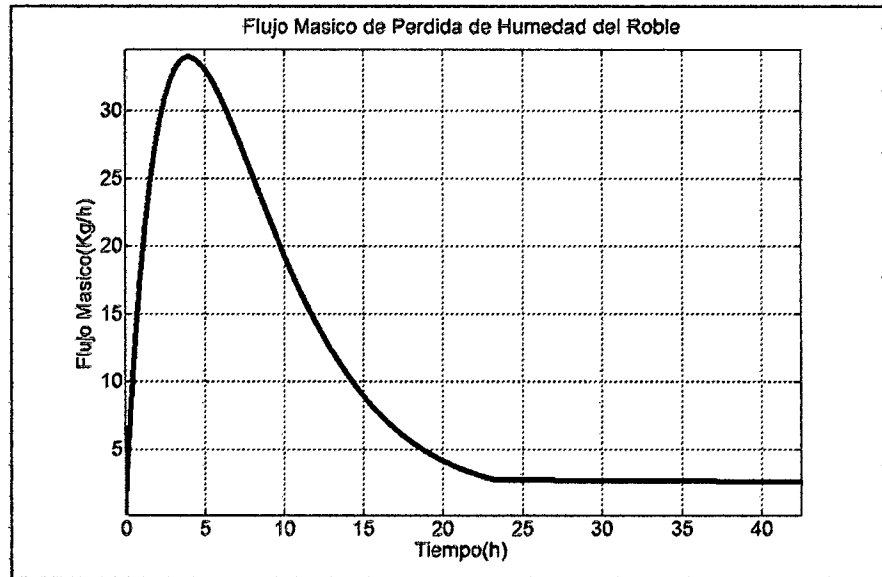


**Figura 62. Flujos de Entrada al Secador**

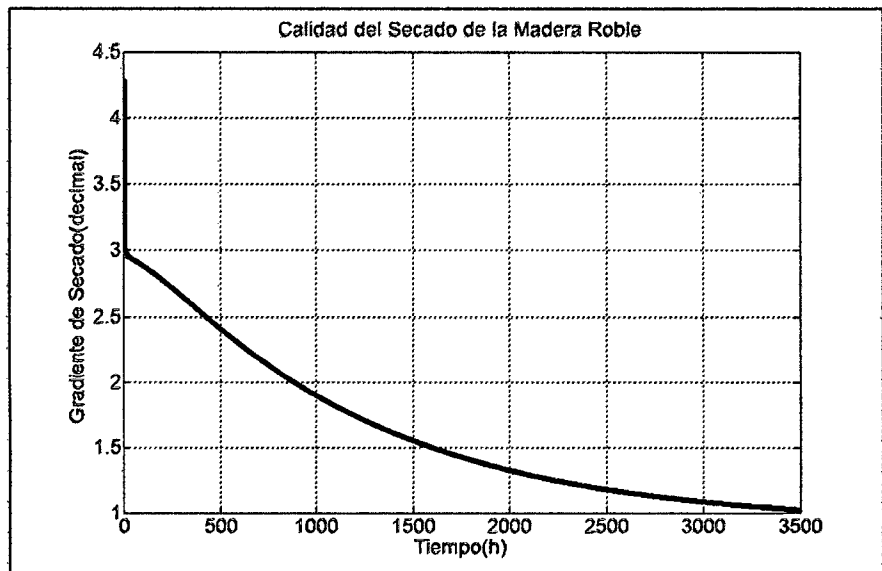
Al aplicar las entradas mostradas en la figura 62, se obtienen los resultados mostrados desde la figura 63 hasta la 65.



**Figura 63. Contenido de Humedad de la Madera y en Equilibrio**



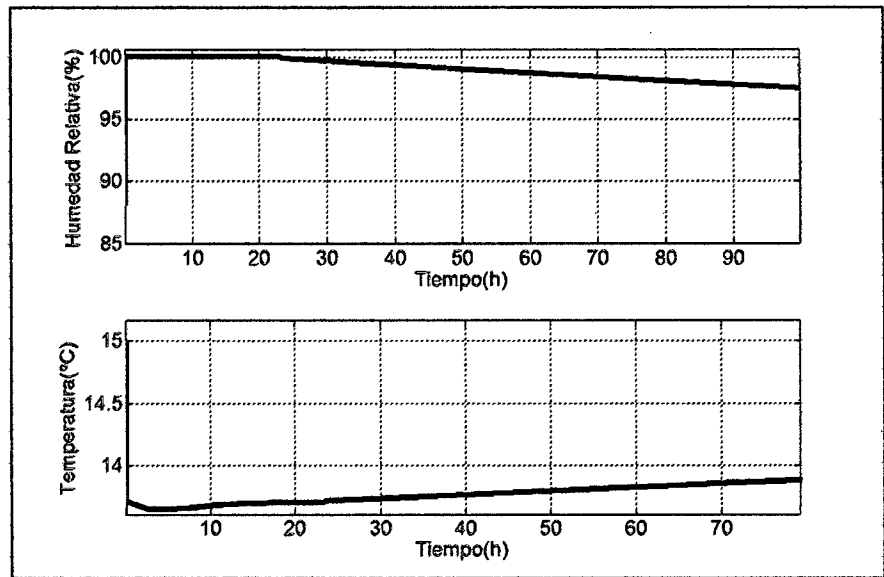
**Figura 64. Flujo Másico de Pérdida de Humedad del Roble**



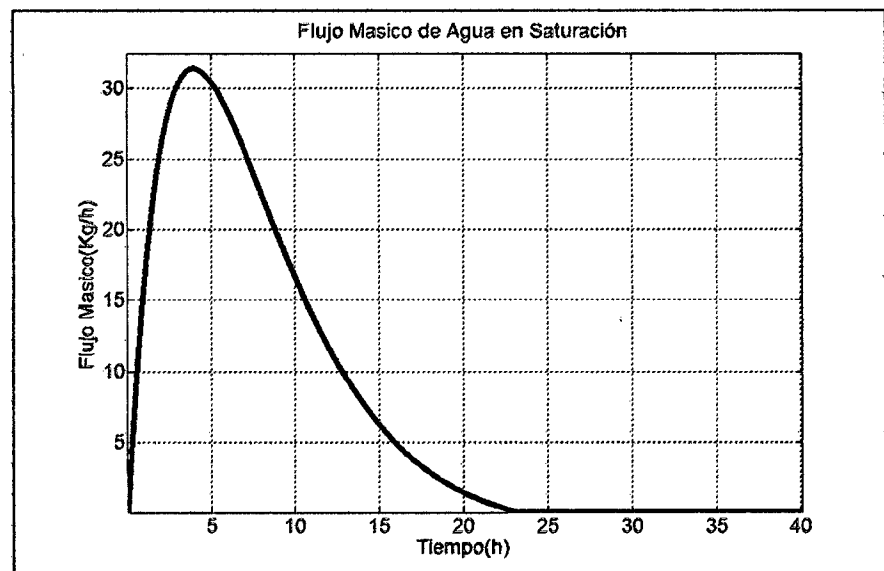
**Figura 65. Gradiente de Secado**

De la figura 63, se puede observar que, con el nuevo juego de valores de entrada, se logra disminuir la humedad del roble. Sin embargo, como se observa en la figura 65, el gradiente de secado toma su valor mínimo permitido (2.5) en

un tiempo aproximado de 500 horas sin que la humedad del roble se acerque si quiera a su punto de saturación. En las figuras 66 y 67, se presentan los resultados de respaldo que tratarán de explicar el porqué de este fenómeno.



**Figura 66. Condiciones Psicrométricas del Aire dentro de la Cámara de Secado**



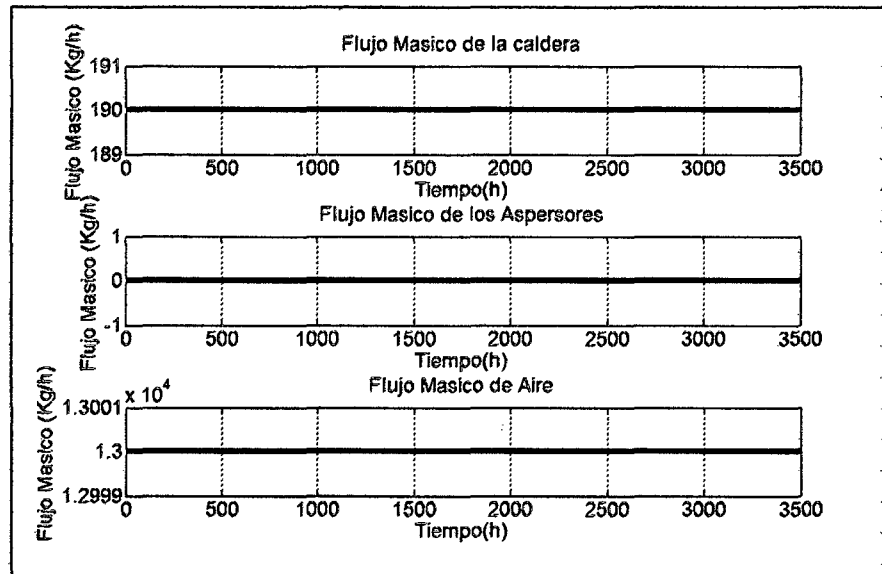
**Figura 67. Flujo Másico de Agua por Saturación**

En la figura 67, se observa que el flujo másico de agua por saturación es menor, aunque bastante cercano, que el flujo másico de pérdida de humedad lo cual atenúa enormemente el efecto de este último sobre el roble durante las primeras horas de secado, que es donde el flujo resultante (pérdida-saturación) debería ser máximo para acelerar el proceso de secado. Esto se debe a que, durante las primeras horas de secado, el aire dentro de la cámara se satura debido a la disminución de su temperatura tal y como se observa en la figura 66.

Por tanto, la aplicación de flujo másico de aire a la entrada de la cámara genera pérdida de humedad por parte del roble de forma muy lenta debido a la saturación del aire interno durante las primeras horas.

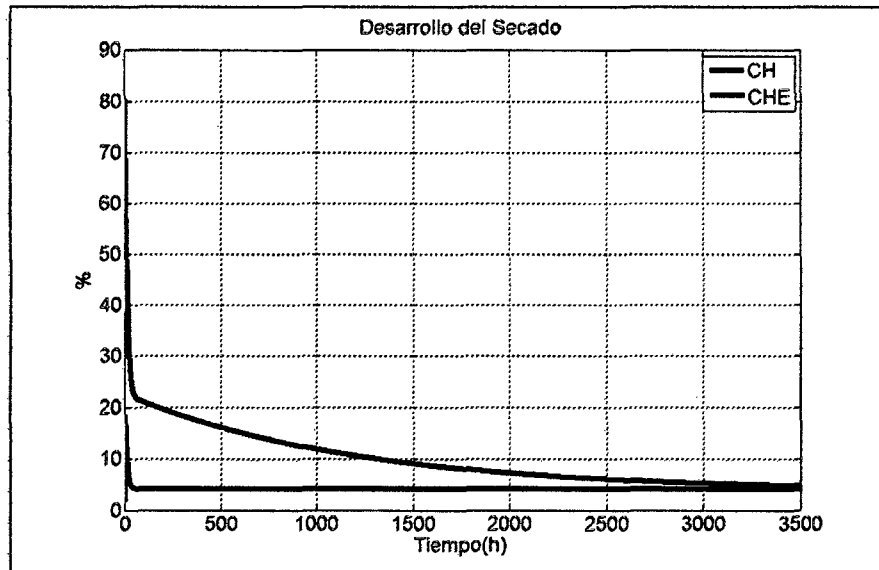
### **Experimento 3**

Como se demostró en el experimento 2, la aplicación de flujo másico de aire a la entrada de la cámara genera una lenta disminución de la humedad del roble debido a las condiciones de saturación del aire durante las primeras horas de secado; dicha saturación se genera a partir de la disminución de la temperatura del aire dentro de la cámara que a su vez es generada por el calor que cede el aire al roble para que este inicie su proceso de secado. Entonces, para evitar dicho ambiente saturado, se debe compensar la disminución de temperatura con un flujo de aire calentado mediante la circulación de vapor saturado proveniente de la caldera a través de los radiadores de la cámara lo cual se realizará en el experimento 3 tal y como se muestra en la figura 68.

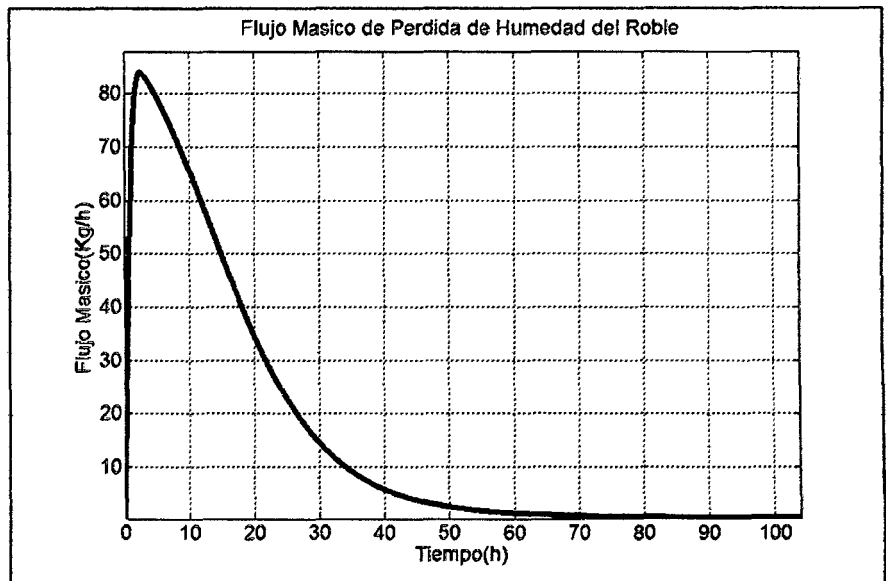


**Figura 68. Flujos de Entrada al Secador**

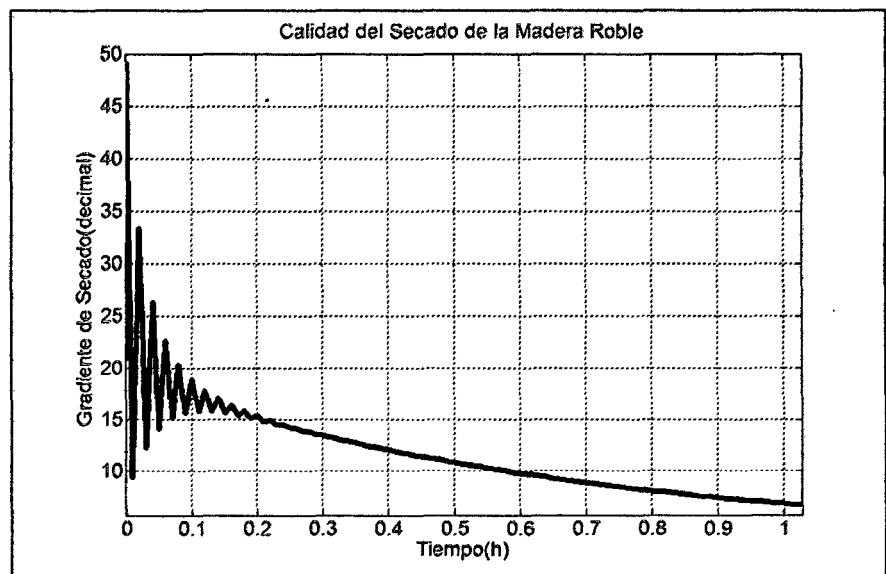
Al aplicar las entradas mostradas en la figura 68, se obtienen los resultados mostrados desde la figura 69 hasta la 71.



**Figura 69. Contenido de Humedad de la Madera y en Equilibrio**



**Figura 70. Flujo Másico de Pérdida de Humedad del Roble**

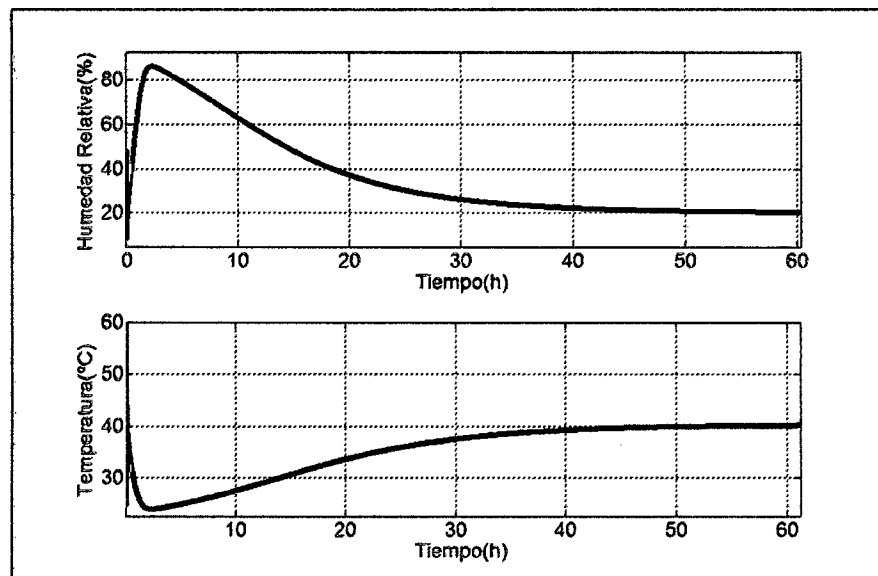


**Figura 71. Gradiente de Secado**

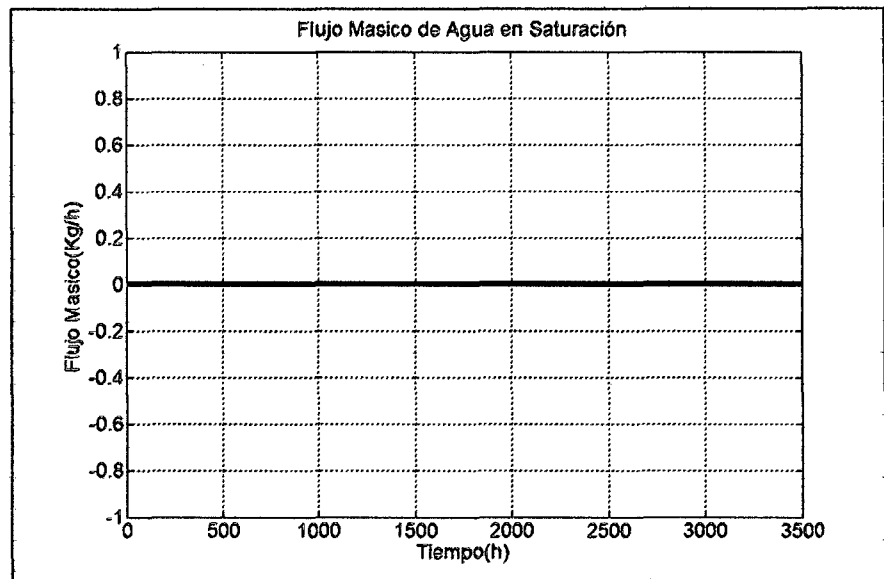
En la figura 69, se observa que el proceso de pérdida de humedad por parte del roble aumenta enormemente a comparación del experimento 2 debido al aumento en el flujo másico de pérdida de humedad que se observa en la figura



70 y, como se presentará en la figura 73, a la no existencia de flujo másico de agua por saturación. Sin embargo, de la figura 71, se puede observar que el gradiente de secado adquiere valores extremadamente altos lo cual trae como consecuencia una calidad de roble muy baja (de acuerdo a lo que se presentó en el capítulo 2 del presente trabajo). Para dar explicación a la presencia de dicho fenómeno, se presentan las figuras 72 y 73.



**Figura 72. Condiciones Termodinámicas del Aire dentro de la Cámara de Secado**



**Figura 73. Flujo Másico de Agua por Saturación**

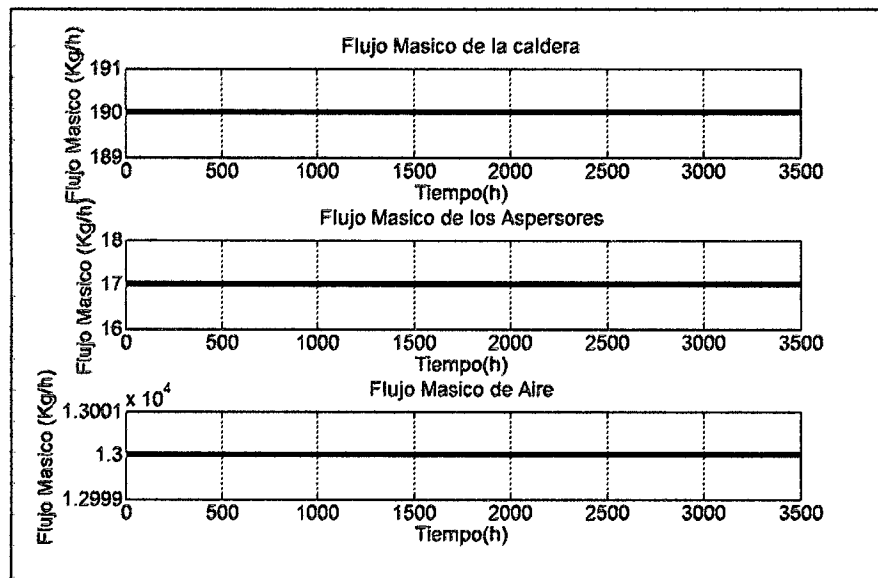
De la figura 73, se comprueba que el flujo másico de agua por saturación es nulo durante todo el proceso de secado lo cual contribuye a la rapidez de este proceso; sin embargo, se puede observar que la ausencia de dicho flujo se debe a las condiciones muy severas del aire dentro de la cámara de secado (temperatura de bulbo seco muy alta y humedad relativa muy baja).

Por tanto, la presencia de flujos constantes de vapor de la caldera y del aire a la entrada del secador contribuye a la aceleración del proceso de secado pero disminuye enormemente la calidad del secado.

#### **Experimento 4**

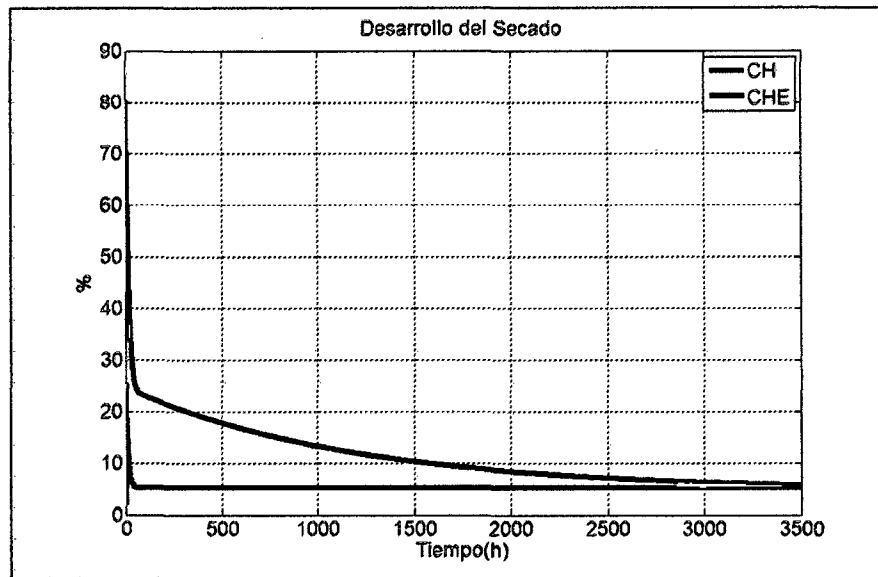
En el experimento 3, se observó que la combinación de flujo de vapor proveniente de la caldera y del aire a la entrada de la cámara aumentan la

velocidad de secado pero disminuye enormemente la calidad del secado debido a las condiciones extremas del aire interno; sin embargo, dichas condiciones extremas se pueden atenuar con la presencia de flujo másico proveniente de los aspersores lo cual se realizará en el presente experimento tal y como se muestra en la figura 74.

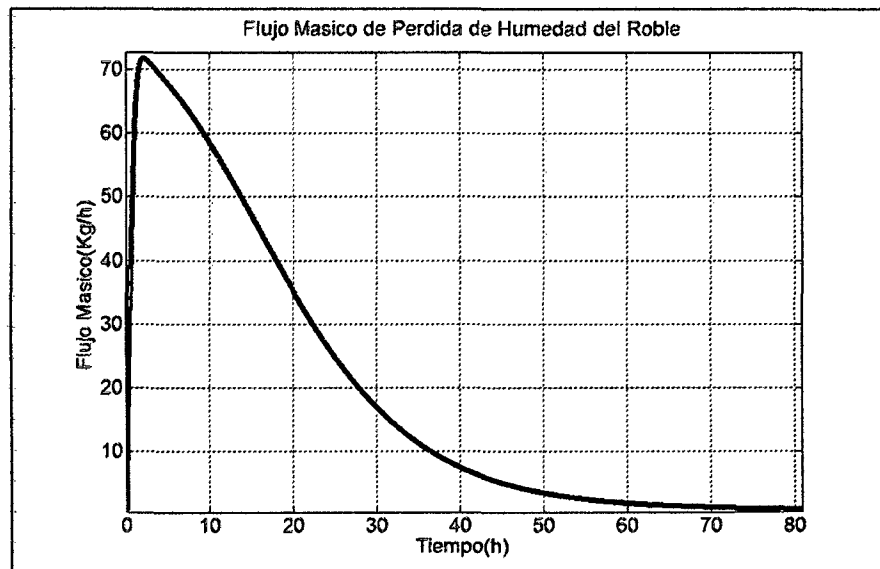


**Figura 74. Flujos de Entrada al Secador**

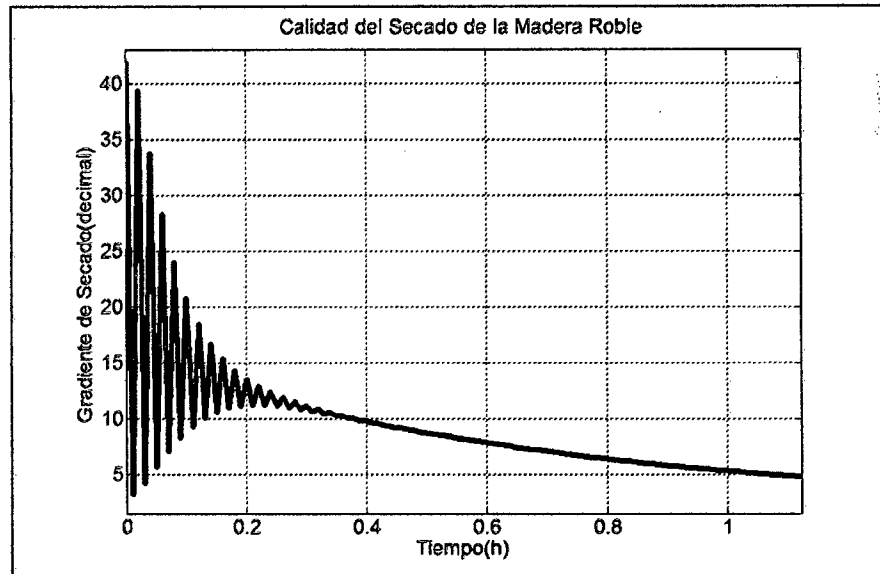
Al aplicar las entradas mostradas en la figura 74, se obtienen los resultados mostrados desde la figura 75 hasta la 77.



**Figura 75. Contenido de Humedad de la Madera y en Equilibrio**

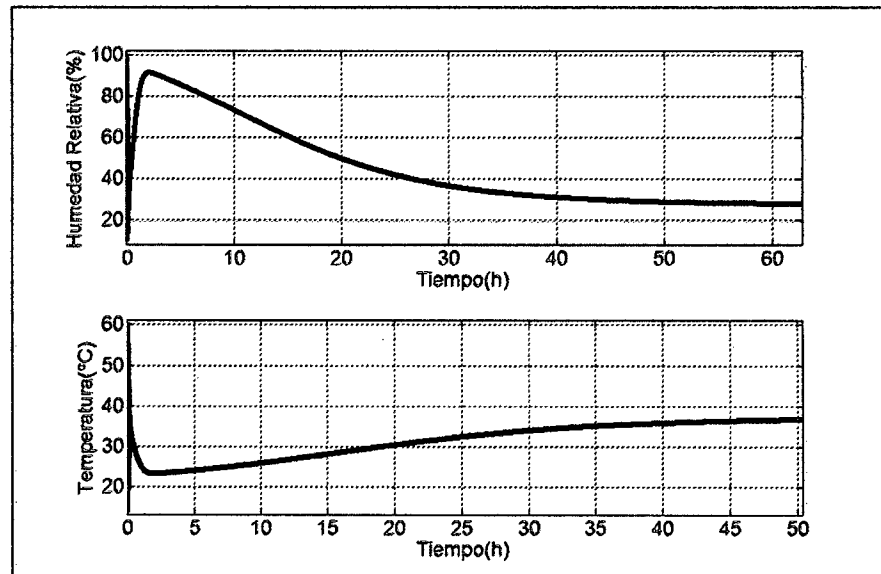


**Figura 76. Flujo Másico de Pérdida de Humedad del Roble**

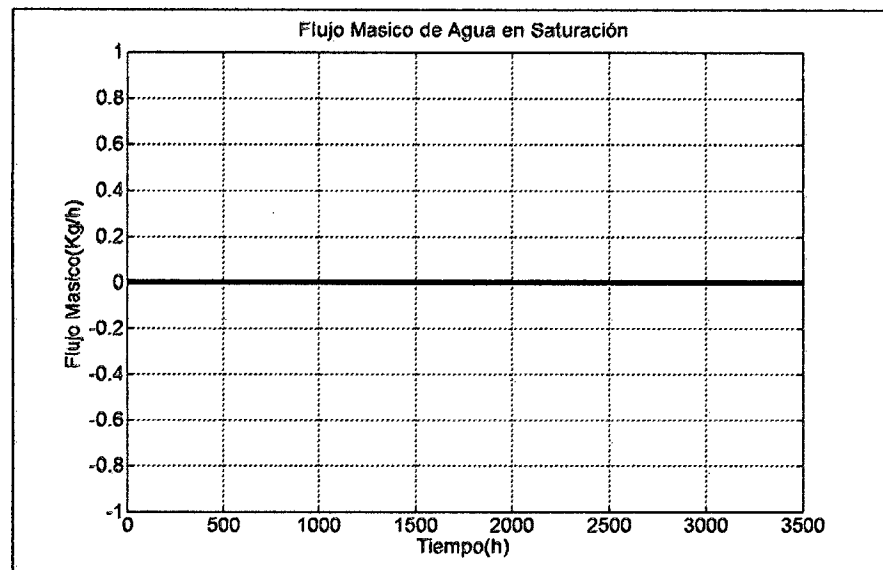


**Figura 77. Gradiente de Secado**

De la figura 75, se puede observar que el proceso de secado del roble disminuye, aunque no notablemente, respecto al experimento 3 debido a la disminución de flujo másico de pérdida de humedad tal como se muestra en la figura 76; sin embargo, se puede ver de la figura 77 que el gradiente de secado del roble también disminuye lo cual representa una mejora en la calidad de la madera aunque no sea la óptima. Además, como se presenta en la figura 78, las condiciones severas del aire dentro de la cámara de secado se atenúan respecto al experimento 3 manteniendo aun el flujo másico de agua por saturación en un valor nulo tal y como se muestra en la figura 79.



**Figura 78. Condiciones Termodinámicas del Aire dentro de la Cámara de Secado**



**Figura 79. Flujo Másico de Agua en Saturación**

Por tanto, se puede concluir que la presencia de flujo másico de vapor proveniente de los aspersores puede aumentar la calidad del roble por medio de

la atenuación de las condiciones severas dentro de la cámara de secado generadas por la presencia de flujo másico de aire y de vapor de la caldera.

### **Experimento 5**

Con la realización de los experimentos 1 hasta el 4, se logró obtener una idea del comportamiento del aire dentro de la cámara y de la pérdida de humedad del roble; sin embargo, hasta el momento no se ha conseguido obtener los resultados deseados que se plantearon al comienzo del capítulo 4. Por tanto, el objetivo de este último experimento es hallar los patrones de entrada que nos den los resultados “óptimos” planteados. Para esto, recordemos las premisas obtenidas de los experimentos anteriores:

- La presencia de flujo másico de aire a la entrada de la cámara de secado permite el inicio del proceso de secado aunque de forma muy lenta.
- La presencia de flujo másico proveniente de la caldera en conjunto con el flujo másico de aire a la entrada da como resultado un flujo de aire con suficiente potencial para acelerar el proceso de secado a costa de la disminución de la calidad de la madera.
- La presencia de flujo másico proveniente de los aspersores en conjunto con los dos flujos másicos anteriores aumenta la calidad de la madera y permite la aceleración de dicho proceso.

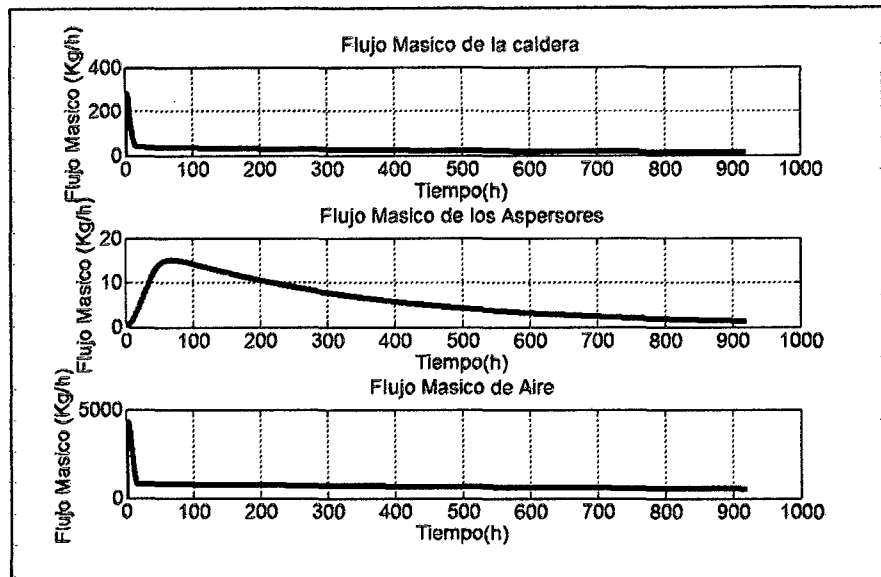
- El proceso de secado del roble debe ser lo más rápido posible durante las primeras horas de secado por encontrarse la humedad de la madera por encima del punto de saturación de las fibras.

De lo anterior, se puede establecer un patrón de entradas con las siguientes características:

- Flujo másico de aire a la entrada de la cámara de valor alto durante las primeras horas del proceso de secado.
- Flujo másico de vapor de agua saturado de valor alto circulando a través de los radiadores de la cámara durante las primeras horas de secado, donde este tiempo es el mismo de la premisa anterior.
- Flujo másico de vapor de agua proveniente de los aspersores para mantener la calidad del roble lo más alta posible.

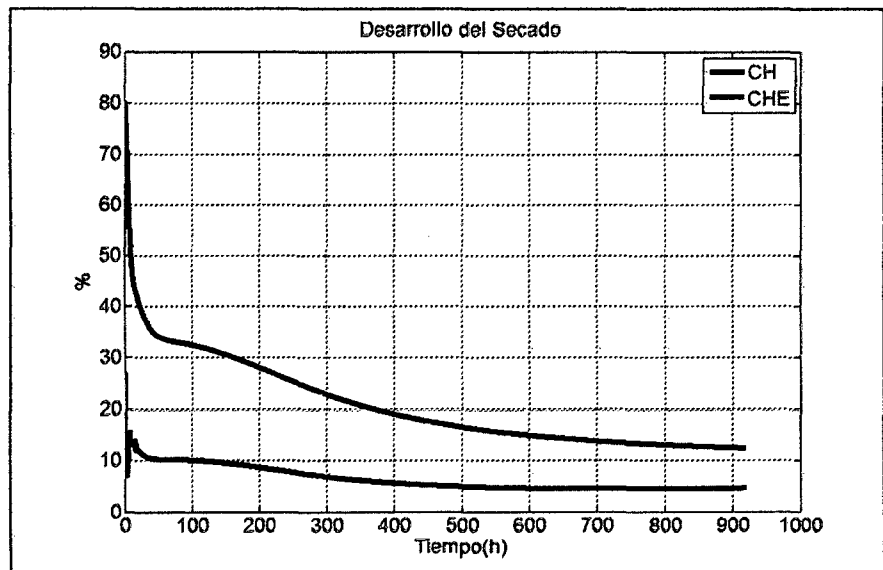
Teniendo en cuenta las características mencionadas para los flujos másicos, se probaron diversos patrones de entrada; sin embargo, los flujos másicos de entrada que generaron resultados muy próximos a los resultados “óptimos” se muestran en la figura 80.



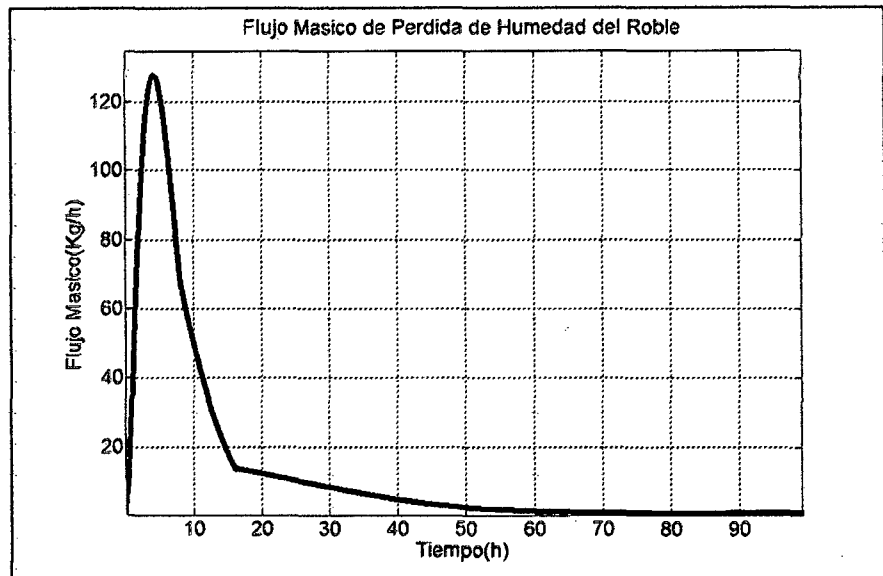


**Figura 80. Flujos de Entrada al Secador**

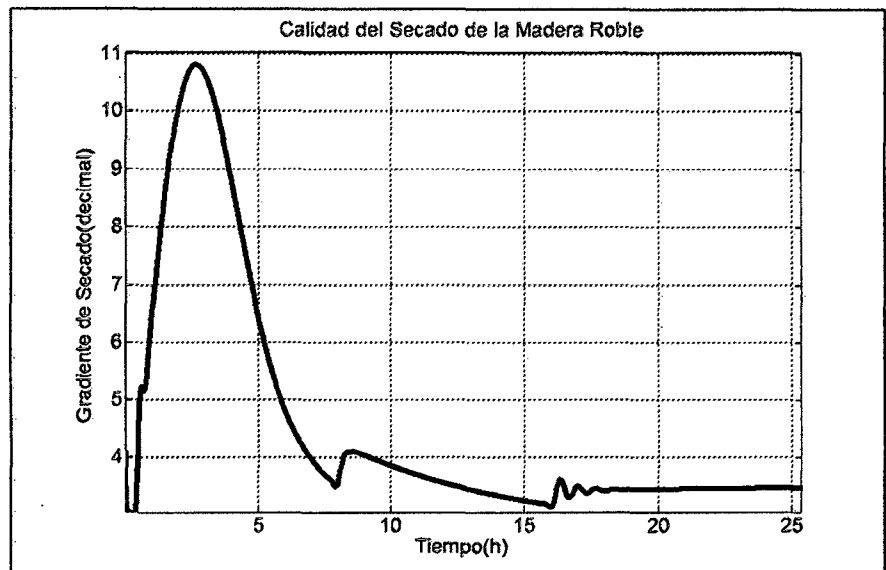
Al aplicar las entradas mostradas en la figura 80, se obtienen los resultados mostrados desde la figura 81 hasta la 83.



**Figura 81. Contenido de Humedad de la Madera y en Equilibrio**



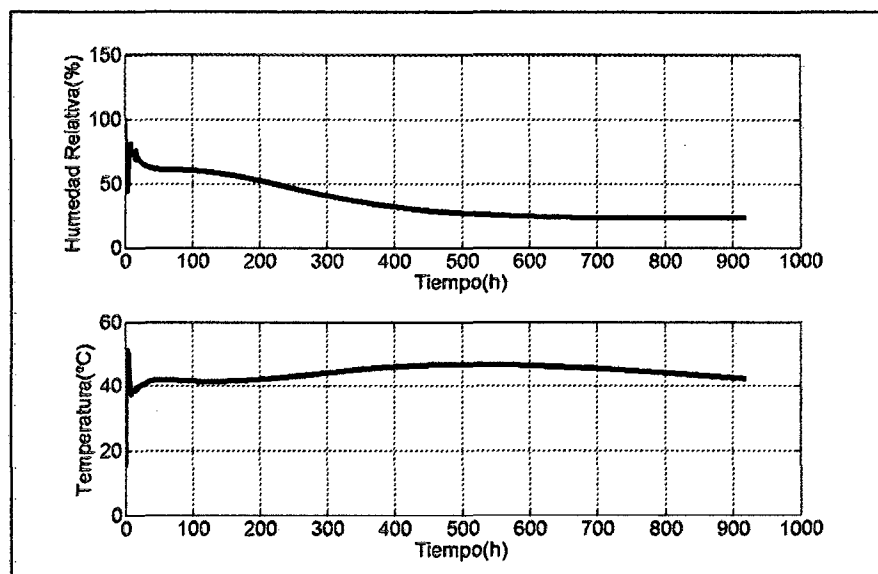
**Figura 82. Flujo Másico de Pérdida de Humedad del Roble**



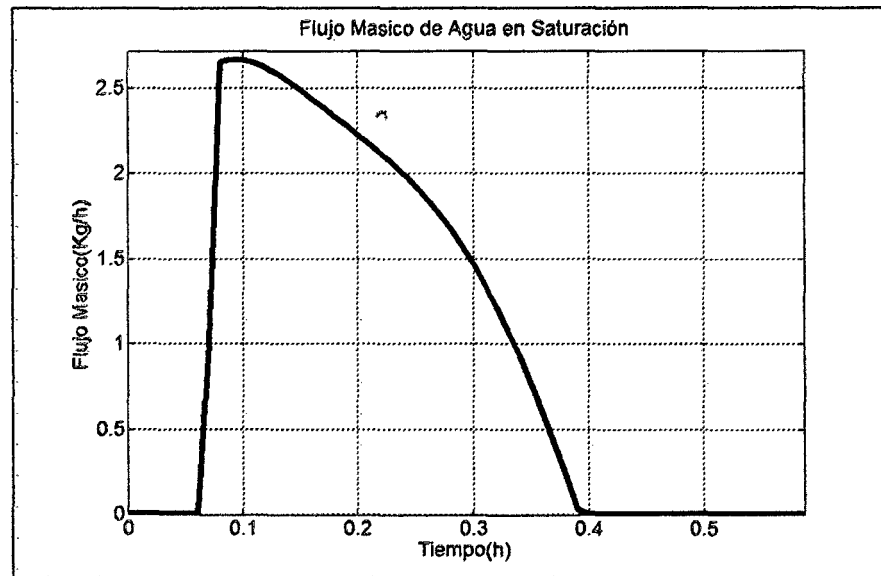
**Figura 83. Gradiente de Secado**

Se puede observar, de la figura 83, que el gradiente de secado del roble, a diferencia de los experimentos 3 y 4, se encuentra dentro del rango establecido a inicios del capítulo 4 lo cual trae como consecuencia que la calidad de la

madera se mantenga. Además, de la figura 81, se puede observar que el proceso de secado de dicha madera aún conserva la efectividad en cuanto a la pérdida de humedad de los experimentos mencionados; esto se debe a que el flujo másico de pérdida de humedad del roble es mucho mayor, en las primeras horas de secado, que el resto de los flujos másicos vistos en los anteriores experimentos y, como se presentará en la figura 85, el flujo másico de agua por saturación es de un valor muy pequeño lo cual trae como consecuencia que la efectividad de secado del flujo másico de pérdida de humedad del roble se mantenga. Se debe agregar que el flujo másico de agua por saturación se mantiene prácticamente nulo debido a las condiciones de no saturación del aire interno de la cámara que, a diferencia de lo experimentos 3 y 4, no son severas tal y como se muestra en la figura 84.



**Figura 84. Condiciones Termodinámicas del Aire dentro de la Cámara de Secado**



**Figura 85. Flujo Másico de Agua en Saturación**

Por tanto, se ha logrado obtener los patrones de entrada y salida correspondiente al proceso de secado “óptimo”.

**Nota:**

La palabra “**óptimo**”, para el presente trabajo, se emplea para indicar que dicho proceso de secado cumple con lo establecido en la sección 4.3.1 más no que el proceso de secado sea el mejor necesariamente.

**5.3.2. Obtención de Datos para el Diseño del Algoritmo de Control**

Con la finalización del experimento 5, se logró hallar el patrón de entradas para la cámara de secado que nos dan los resultados óptimos deseados; sin embargo,

como se planteará en el siguiente capítulo, se requiere como patrones de entrada para el algoritmo de control:

- **Error de Contenido de Humedad:**  $e_{CH}$
- **Integral del Error de Contenido de Humedad:**  $\int e_{CH}$
- **Derivada del Error de Contenido de Humedad:**  $\frac{de_{CH}}{dt}$

**Nota:**  $e_{CH} = CH_{ref} - CH$

Como se observa, el error de Contenido de Humedad se puede hallar con una simple diferencia; sin embargo, para hallar la derivada del error, aplicaremos una aproximación hacia atrás y, para la integral del error, aplicaremos la fórmula del trapecio mencionado en el capítulo 4.

**Nota:** Las mencionadas fórmulas no se usarán solo durante el diseño del algoritmo de control sino también en la simulación de este último.

Además, como se mostrará en la siguiente sección, se plantean como patrones de salida para el algoritmo de control:

- Voltaje de entrada a la válvula de control de la caldera
- Voltaje de entrada a la válvula de control de los aspersores
- Voltaje de entrada a la válvula de control del aire de entrada.

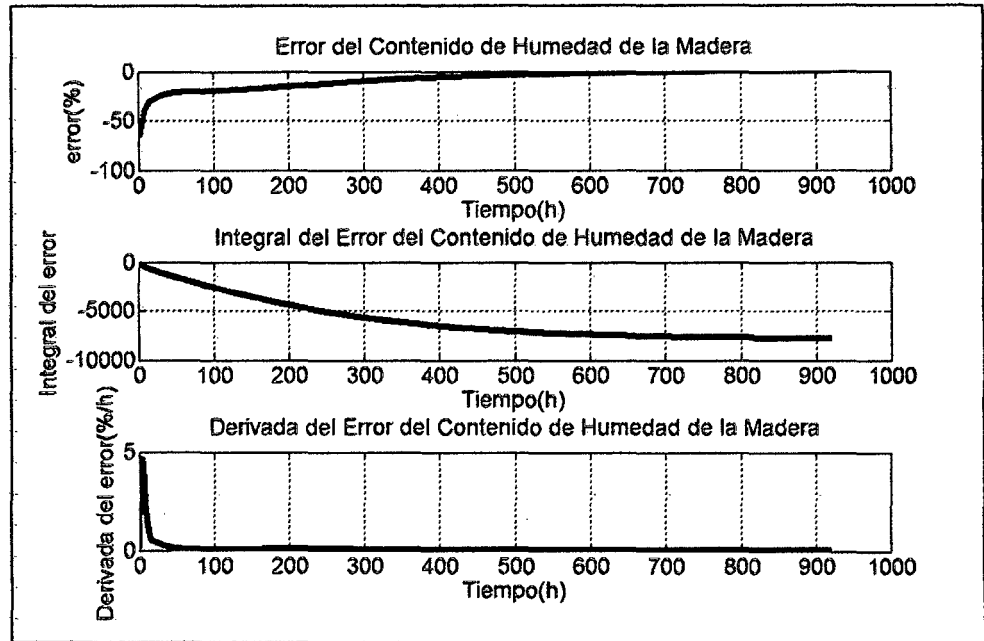
Se debe resaltar que dichos voltajes se encuentran restringidos a un rango de 0 a 5 voltios (voltajes comunes en los controladores electrónicos); sin embargo, dado que se usan válvulas proporcionales para el control, dichas salidas se pueden obtener a partir de un escalamiento de los patrones de entrada a la cámara de secado obtenidos en el experimento 5.

Además, como se mostrará en la siguiente sección, se requiere de dos juegos de datos, que consten de un patrón de entrada y un patrón de salida cada uno, para el diseño del algoritmo de control:

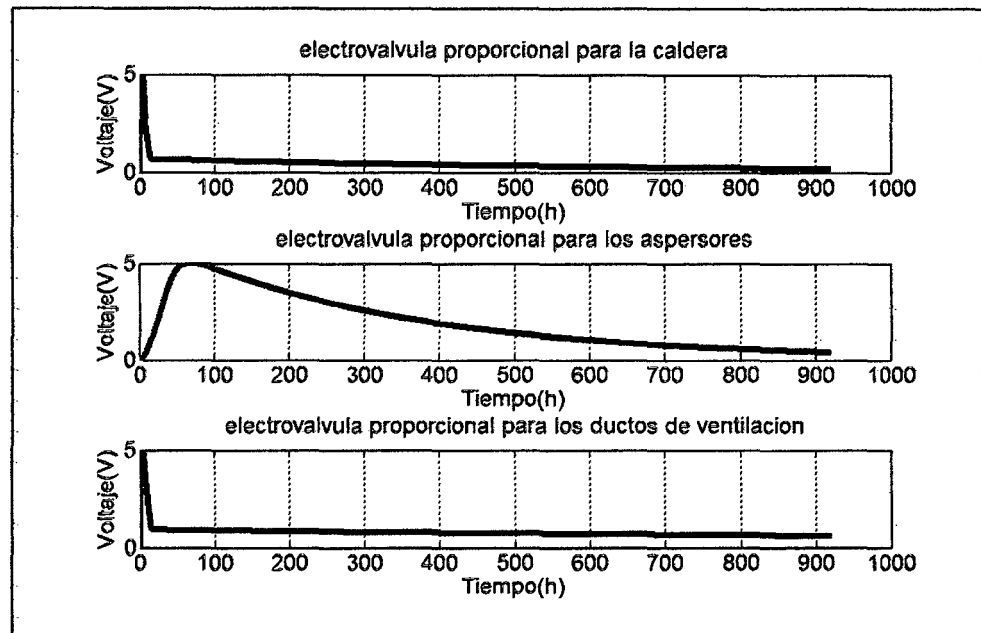
- Datos de estimación, [4], [8].
- Datos de validación, [4], [8].

Donde dichos datos de estimación y validación deben ser lo más parecidos posibles para un adecuado diseño, [4], [8].

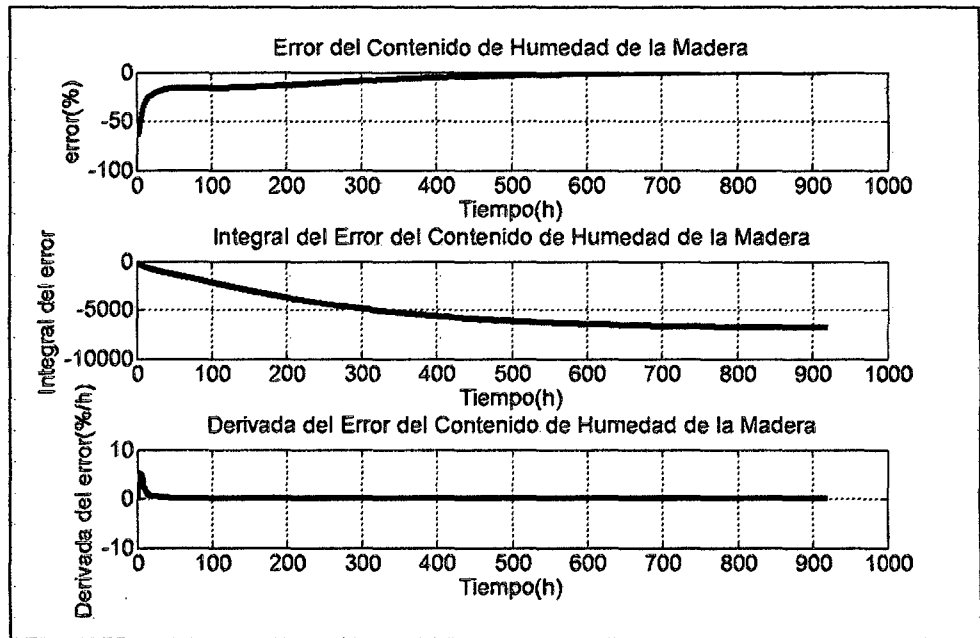
Para terminar, dichos datos de estimación, presentados en las figuras 86 y 87, se obtendrán de los resultados obtenidos en el experimento 5 y los datos de validación, presentados en las figuras 88 y 89, se obtendrán a partir de una pequeña variación del experimento 5 obteniéndose así todos los datos necesarios para el diseño del algoritmo de control neuro difuso.



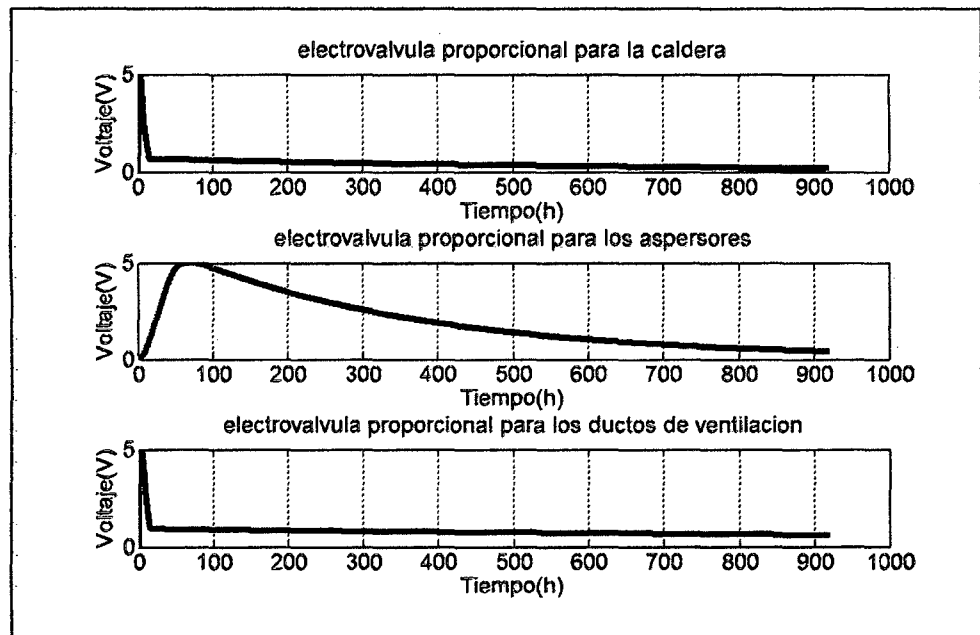
**Figura 86. Entradas del Controlador Difuso - Estimación**



**Figura 87. Salidas del Controlador Difuso - Estimación**



**Figura 88. Entradas del Controlador Difuso – Validación**



**Figura 89. Salidas del Controlador Difuso – Validación**



#### 5.4. DISEÑO DEL ALGORITMO DE CONTROL NEURO DIFUSO PARA EL SECADOR DE MADERA

Para el diseño del algoritmo de control, se plantea la siguiente estructura:

##### 1. Tres entradas al controlador difuso

- a. Error de Contenido de Humedad:  $x_1$
- b. Integral del Error de Contenido de Humedad:  $x_2$
- c. Derivada del Error de Contenido de Humedad:  $x_3$

##### 2. Tres variables lingüísticas por entrada

- a. Bajo
- b. Medio
- c. Alto

##### 3. Funciones de Membrecía: Triangulares

##### 4. Tres salidas del controlador difuso

- a. Voltaje para la válvula de la caldera:  $y_1$
- b. Voltaje para la válvula de los aspersores:  $y_2$
- c. Voltaje para la válvula de aire de entrada:  $y_3$

##### 5. Número de reglas difusas por salida:

El número de reglas difusas por salida está dado por la ecuación (93):

$$R = n^p \quad (93)$$

Dónde:

$n$  : Numero de Entradas del Sistema Difuso.

$p$  : Numero de Variables Linguisticas por Entrada.

$R$  : Numero de Reglas Difusas por Salida

Para el presente trabajo:  $R = 27$

#### 6. Número de reglas difusas totales:

El número de reglas difusas totales está dado por la ecuación (94):

$$R_T = R * m \quad (94)$$

Dónde:

$R$  : Numero de Reglas Difusas por Salida

$m$  : Numero de Salidas del Sistema Difuso

$R_T$  : Numero de Reglas Difusas Totales

Para el presente trabajo:  $R_T = 81$

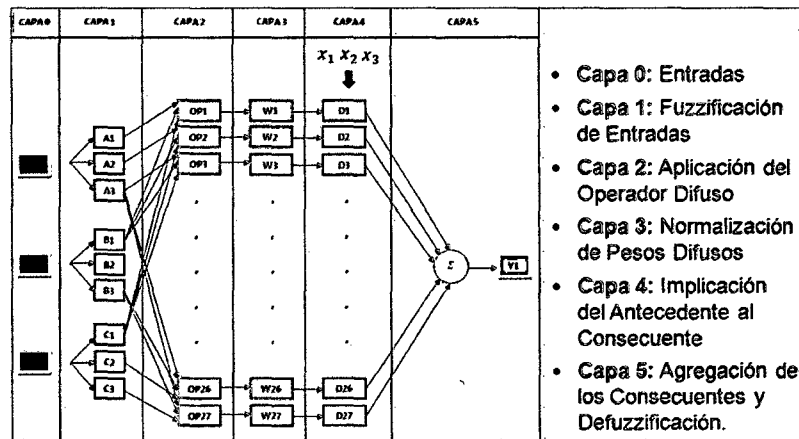
#### 7. Método de Inferencia Difusa: Sugeno de Orden 0.

Se debe resaltar que el método de Takagi Sugeno parte del método de Mandami usando para su construcción la arquitectura de las redes neuronales artificiales. Para entender esta idea, recordemos los pasos que se realizan con el método de Mandami:

1. Fuzzificación de Entradas.
2. Aplicación del Operador Difuso.
3. Implicación del Antecedente con el Consecuente de la Regla.
4. Agregación del Consecuente de cada Regla.
5. Defuzzificación.

Como se mencionó en el presente capítulo, las redes neuronales son modelos matemáticos que no requieren conocer a priori la función que relaciona un

proceso cualquiera sino que realiza una aproximación de dicho proceso a partir de datos experimentales; si se aplica este concepto al Método de Mandami, con ciertas modificaciones, obtenemos el Método de Sugeno cuya arquitectura se presenta en la figura 90 aplicado al presente trabajo.



**Figura 90. Estructura del Método de Takagi Sugeno.**

Se debe resaltar que en el Método de Takagi Sugeno existen 5 capas ocultas que tienen como tarea realizar cada uno de los pasos correspondientes al proceso de inferencia difusa, [8]; es decir, cada capa de la red neuronal tiene asignada una función del proceso de inferencia difusa:

- **Capa 0:** Recepción de Entradas.
- **Capa 1:** Fuzzificación de Entradas
- **Capa 2:** Aplicación del Operador Difuso
- **Capa 3:** Normalización de los Pesos Difusos
- **Capa 4:** Implicación del Antecedente al Consecuente
- **Capa 5:** Agregación de los Consecuentes de cada Regla.

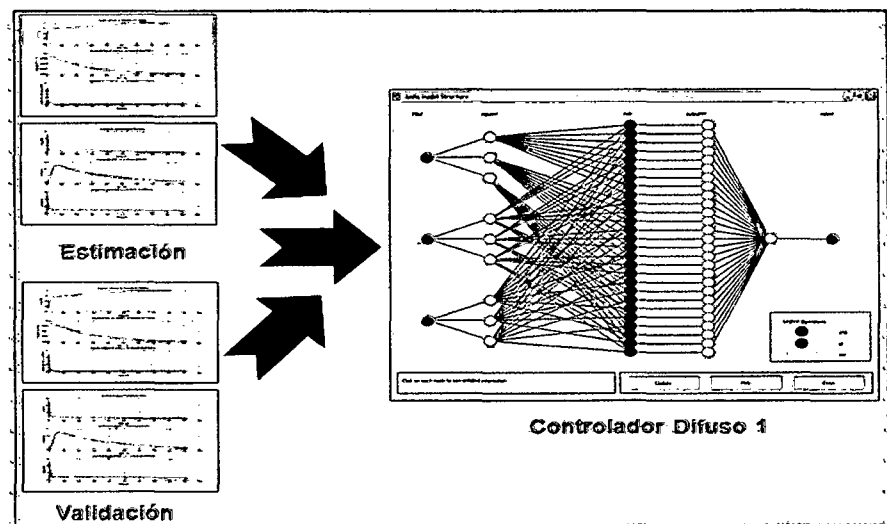
**Nota:**

- La capa 3 del Método de Takagi Sugeno surge a partir de la aplicación de redes neuronales al campo de la lógica difusa.
- Se debe aclarar que el proceso de defuzzificación se realiza en la capa 4 de la red neuronal multicapa ya que, a diferencia del Método de Mandami, el consecuente de cada regla es un número crisp o real y no un número difuso; dicho número real puede determinarse a partir de un **polinomio multivariable de Orden 0 u Orden 1, [8]**, teniendo como variables las **entradas de la Red Neuro - Difusa**.

Se puede observar que la principal ventaja del Método de Takagi Sugeno sobre el Método de Mandami consiste en que las reglas difusas se definen a partir de datos experimentales (como ocurre en las redes neuronales) lo cual representa una enorme ventaja cuando la cantidad de reglas requeridas para dicho sistema es muy grande y no puede determinarse intuitivamente como es el caso del presente trabajo.

Sin embargo, para el diseño de un Sistema de Control Difuso de Tipo Takagi Sugeno (conocido también como “**Sistema Neuro – Difuso**”), se debe de disponer de dos juegos de datos (como ocurre en las redes neuronales); el primer juego se denomina “**datos de estimación**” que es usado para hallar el algoritmo de control neuro difuso que mejor se aproxime a dicho juego de datos (lo que en redes neuronales se denomina “**entrenamiento de la red**”) y un segundo juego denominado “**datos de validación**” que es usado para verificar

que el controlador diseñado haya captado la naturaleza del juego de datos de estimación sin incluir el ruido presente en dicho juego para así evitar el fenómeno conocido en redes neuronales como “**Sobre-Entrenamiento de la Red**”, [4], [8]. En la figura 91, se muestra un esquema que representa el proceso de estimación y validación mencionado.



**Figura 91. Presentación de Datos al Sistema Difuso**

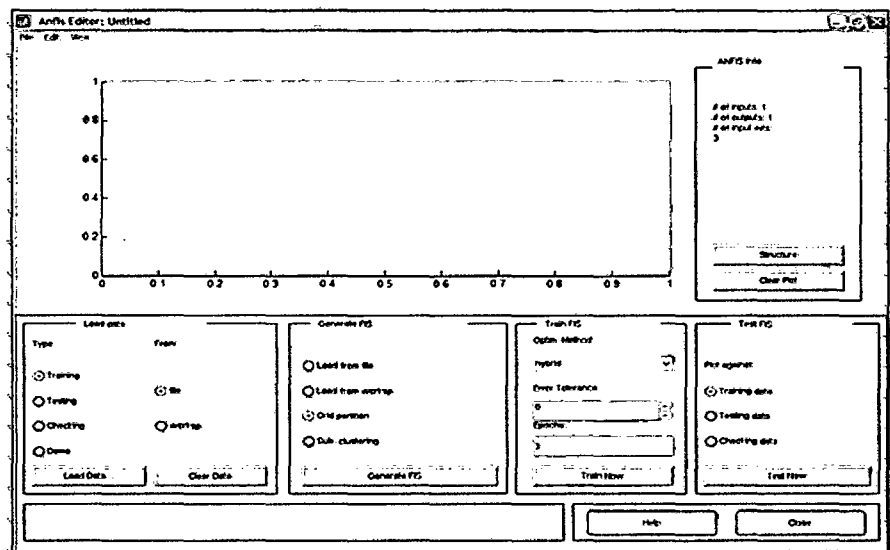
Cabe resaltar que los juegos de datos de estimación y de validación, para este tipo de arquitecturas, deben de ser similares ya que de otro modo no podremos entrenar de forma adecuada a nuestro algoritmo, [4], [8].

Luego de conocer la arquitectura y las ventajas del Método de Inferencia Difusa de Takagi Sugeno, pasamos a configurar las Redes Neuro – Difusas para la válvula proporcional de control de la caldera, de los aspersores y de los ductos de aire de entrada al secador ayudándonos del Toolbox de Lógica Difusa del Software Matlab, [8]; se debe de resaltar que, para el presente trabajo, solo se

mostrará el procedimiento de diseño correspondiente a las reglas difusas para la válvula de control de la caldera ya que, para las otras válvulas proporcionales de control, el procedimiento es el mismo (considerando que el sistema de control difuso es de tipo acoplado, [4]).

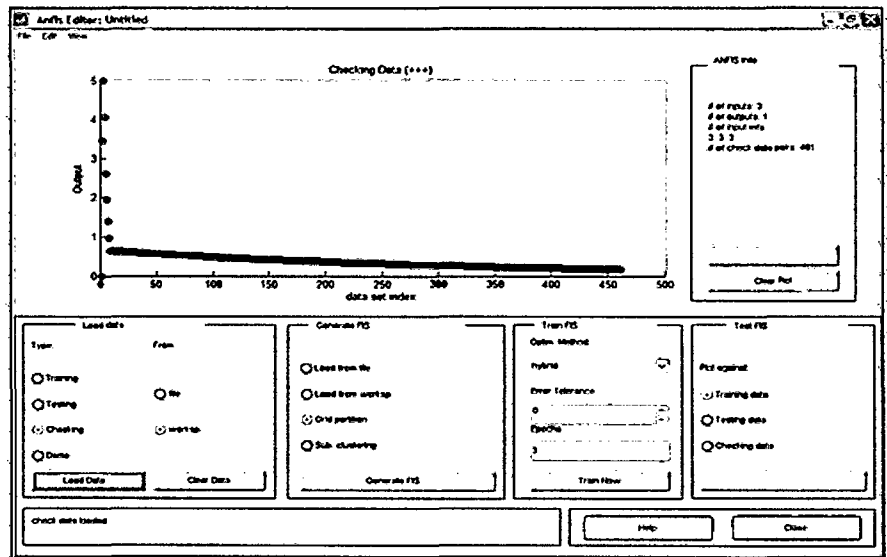
#### 5.4.1 Ingreso de Datos para Estimación y Validación.

Para ingresar los datos de estimación y validación de la Red Neuro – Difusa, debemos de abrir primero el Toolbox de lógica difusa del software Matlab, para lo cual ingresamos en la ventana de comandos la palabra “Anfis Edit”, [8], con lo cual se abrirá ventana que se muestra en la figura 92.



**Figura 92. Toolbox de Lógica Difusa del Matlab**

Una vez que aparece la ventana del Toolbox de Lógica Difusa, cargamos los datos de estimación y validación, el cual se muestra en la figura 93.

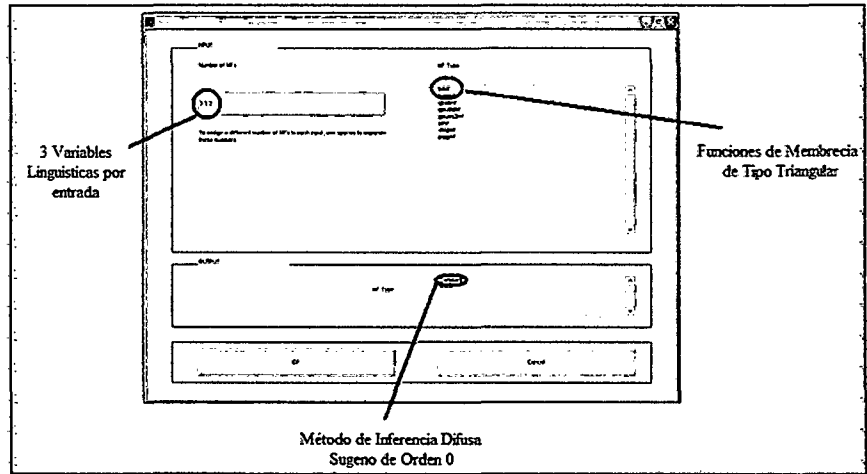


**Figura 93. Datos de Estimación y Validación.**

#### 5.4.2. Definición de Funciones de Membrecía para las Entradas y del Grado del Método de Takagi Sugeno.

Como se mencionó al comienzo de la presente sección, usaremos 3 variables lingüísticas para cada entrada, con funciones de membrecía de tipo triangular y con un Método de Inferencia de Takagi Sugeno de Orden 0 (Orden del Polinomio Multivariable mencionado al comienzo de la presente sección).

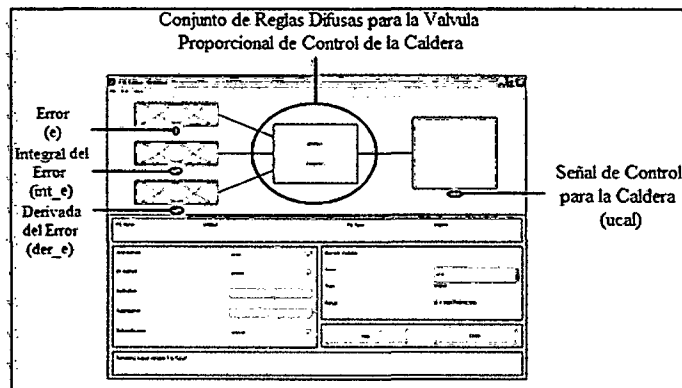
Todos estos valores se configuran en la ventana que se muestra en la figura 94.



**Figura 94. Definición del Número y del Tipo de Funciones de Membrecía y el orden del Algoritmo de Control Difuso Takagi Sugeno.**

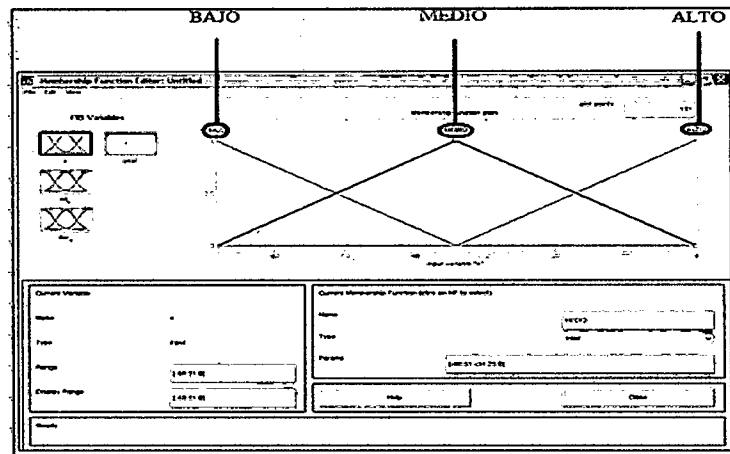
**5.4.3. Definición Etiquetas y Rangos para las Variables Lingüísticas de las Entradas**

En la sección 5.4.2 se definió el Número de Variables Lingüísticas, ahora se definirán las etiquetas y rangos de dichas variables lingüísticas tal y como se presentan en las figuras 95 y 96.



**Figura 95. Definición de las Etiquetas para las Variables Lingüísticas para el error del sistema**





**Figura 96. Definición de Rangos para las Variables Lingüísticas del error del Sistema**

**Nota:**

Para el caso de la derivada y la integral del error, el procedimiento es el mismo.

**5.4.4. Obtención de las Reglas Difusas para el Algoritmo de Control**

Ahora que hemos configurado todos los parámetros necesarios, procedemos a la obtención de las reglas difusas de nuestro algoritmo presentándole los datos de Estimación y Validación cargados previamente. En la figura 97 se muestra el gráfico correspondiente al error absoluto entre los datos de entrada y las reglas difusas halladas donde la curva más baja corresponde al resultado obtenido de los datos de estimación y la curva más alta corresponde al resultado obtenido de los datos de validación.

Podemos observar de la figura 97 que el error usando tanto los datos de estimación como los de validación no sobrepasan el 0.03 (esto es  $100 * 0.03 / 5 = 0.6\%$ ).

En la figura 98 se muestra el gráfico de la salida del controlador difuso de la caldera usando como entradas los datos de validación donde se observa que la curva obtenida se aproxima bastante a la que se obtuvo de los datos experimentales; por tanto, se ha obtenido y validado exitosamente las reglas de inferencia difusa para la válvula de control de la caldera.

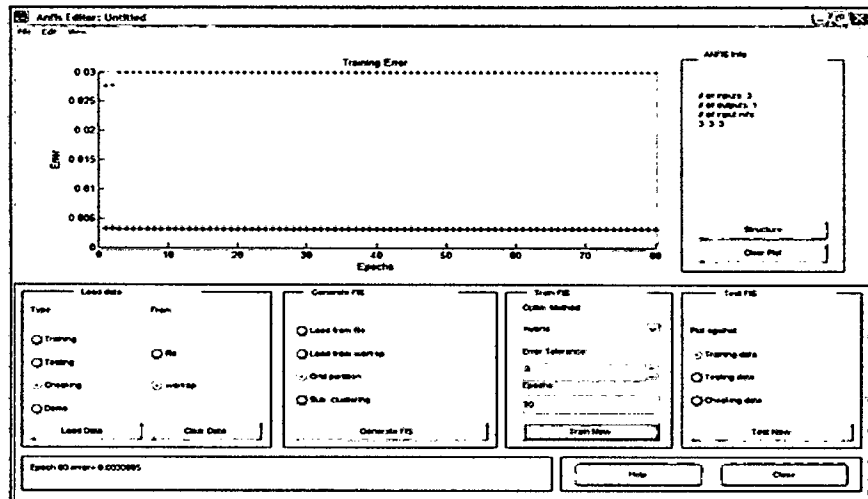


Figura 97. Entrenamiento de la Red Neuro Difusa

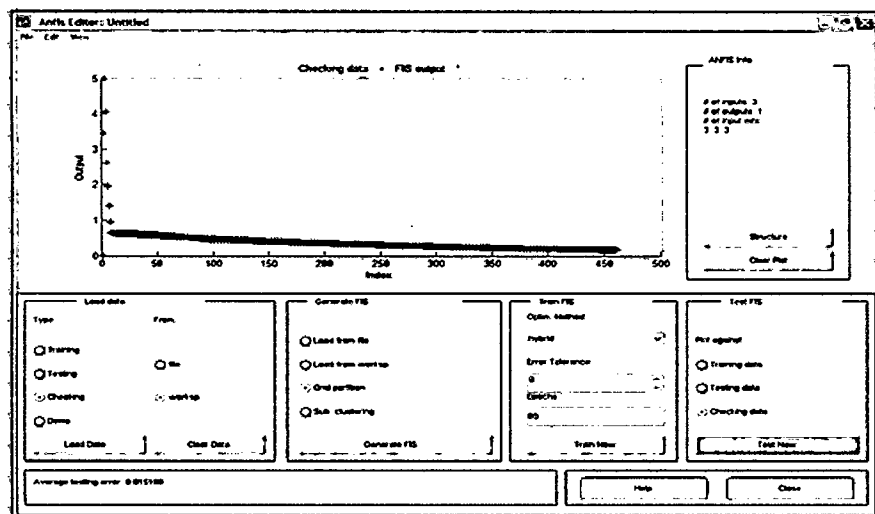


Figura 98. Validación del Controlador Neuro Difuso

**Reglas de Inferencia para el Flujo Másico de Vapor de la Caldera**

1. If (e is Bajo) and (int\_e is Bajo) and (der\_e is Bajo) then (ua is 0)
2. If (e is Bajo) and (int\_e is Bajo) and (der\_e is Medio) then (ua is 0)
3. If (e is Bajo) and (int\_e is Bajo) and (der\_e is Alto) then (ua is 0)
4. If (e is Bajo) and (int\_e is Medio) and (der\_e is Bajo) then (ua is 0.3871)
5. If (e is Bajo) and (int\_e is Medio) and (der\_e is Medio) then (ua is -  
4.287)
6. If (e is Bajo) and (int\_e is Medio) and (der\_e is Alto) then (ua is 0.8459)
7. If (e is Bajo) and (int\_e is Alto) and (der\_e is Bajo) then (ua is -  
0.001485)
8. If (e is Bajo) and (int\_e is Alto) and (der\_e is Medio) then (ua is 2.781)
9. If (e is Bajo) and (int\_e is Alto) and (der\_e is Alto) then (ua is 5.503)
10. If (e is Medio) and (int\_e is Bajo) and (der\_e is Bajo) then (ua is 1.476)
11. If (e is Medio) and (int\_e is Bajo) and (der\_e is Medio) then (ua is -  
28.89)
12. If (e is Medio) and (int\_e is Bajo) and (der\_e is Alto) then (ua is 0)
13. If (e is Medio) and (int\_e is Medio) and (der\_e is Bajo) then (ua is  
0.6659)
14. If (e is Medio) and (int\_e is Medio) and (der\_e is Medio) then (ua is  
0.6135)
15. If (e is Medio) and (int\_e is Medio) and (der\_e is Alto) then (ua is -  
0.7889)
16. If (e is Medio) and (int\_e is Alto) and (der\_e is Bajo) then (ua is 0.0253)

17. If (e is Medio) and (int\_e is Alto) and (der\_e is Medio) then (ua is 2.79)
18. If (e is Medio) and (int\_e is Alto) and (der\_e is Alto) then (ua is 4.897)
19. If (e is Alto) and (int\_e is Bajo) and (der\_e is Bajo) then (ua is 0.1719)
20. If (e is Alto) and (int\_e is Bajo) and (der\_e is Medio) then (ua is -1.679)
21. If (e is Alto) and (int\_e is Bajo) and (der\_e is Alto) then (ua is 0)
22. If (e is Alto) and (int\_e is Medio) and (der\_e is Bajo) then (ua is 0.1716)
23. If (e is Alto) and (int\_e is Medio) and (der\_e is Medio) then (ua is 5.809)
24. If (e is Alto) and (int\_e is Medio) and (der\_e is Alto) then (ua is 0)
25. If (e is Alto) and (int\_e is Alto) and (der\_e is Bajo) then (ua is 1.866)
26. If (e is Alto) and (int\_e is Alto) and (der\_e is Medio) then (ua is -2.482)
27. If (e is Alto) and (int\_e is Alto) and (der\_e is Alto) then (ua is 0)

Si se sigue el mismo procedimiento mostrado de la sección 5.4.1 para la válvula de los aspersores y para el aire de entrada, se obtiene:

#### **Reglas de Inferencia para el Flujo Másico de los Aspersores**

1. If (e is Bajo) and (int\_e is Bajo) and (der\_e is Bajo) then (ua is 0)
2. If (e is Bajo) and (int\_e is Bajo) and (der\_e is Medio) then (ua is 0)
3. If (e is Bajo) and (int\_e is Bajo) and (der\_e is Alto) then (ua is 0)
4. If (e is Bajo) and (int\_e is Medio) and (der\_e is Bajo) then (ua is 1.356)
5. If (e is Bajo) and (int\_e is Medio) and (der\_e is Medio) then (ua is -49.68)

6. If (e is Bajo) and (int\_e is Medio) and (der\_e is Alto) then (ua is -13.48)
7. If (e is Bajo) and (int\_e is Alto) and (der\_e is Bajo) then (ua is -0.04776)
8. If (e is Bajo) and (int\_e is Alto) and (der\_e is Medio) then (ua is 1.062)
9. If (e is Bajo) and (int\_e is Alto) and (der\_e is Alto) then (ua is 0.87)
10. If (e is Medio) and (int\_e is Bajo) and (der\_e is Bajo) then (ua is 9.438)
11. If (e is Medio) and (int\_e is Bajo) and (der\_e is Medio) then (ua is -55.44)
12. If (e is Medio) and (int\_e is Bajo) and (der\_e is Alto) then (ua is 0)
13. If (e is Medio) and (int\_e is Medio) and (der\_e is Bajo) then (ua is 6.466)
14. If (e is Medio) and (int\_e is Medio) and (der\_e is Medio) then (ua is -18.86)
15. If (e is Medio) and (int\_e is Medio) and (der\_e is Alto) then (ua is 16)
16. If (e is Medio) and (int\_e is Alto) and (der\_e is Bajo) then (ua is -0.5927)
17. If (e is Medio) and (int\_e is Alto) and (der\_e is Medio) then (ua is 4.216)
18. If (e is Medio) and (int\_e is Alto) and (der\_e is Alto) then (ua is -0.6962)
19. If (e is Alto) and (int\_e is Bajo) and (der\_e is Bajo) then (ua is 0.2759)
20. If (e is Alto) and (int\_e is Bajo) and (der\_e is Medio) then (ua is 2.16)
21. If (e is Alto) and (int\_e is Bajo) and (der\_e is Alto) then (ua is 0)
22. If (e is Alto) and (int\_e is Medio) and (der\_e is Bajo) then (ua is -0.2444)

23. If (e is Alto) and (int\_e is Medio) and (der\_e is Medio) then (ua is 36.35)
24. If (e is Alto) and (int\_e is Medio) and (der\_e is Alto) then (ua is 0)
25. If (e is Alto) and (int\_e is Alto) and (der\_e is Bajo) then (ua is 18.69)
26. If (e is Alto) and (int\_e is Alto) and (der\_e is Medio) then (ua is 2.496)
27. If (e is Alto) and (int\_e is Alto) and (der\_e is Alto) then (ua is 0)

### **Reglas de Inferencia para el Aire de Entrada**

1. If (e is Bajo) and (int\_e is Bajo) and (der\_e is Bajo) then (ua is 0)
2. If (e is Bajo) and (int\_e is Bajo) and (der\_e is Medio) then (ua is 0)
3. If (e is Bajo) and (int\_e is Bajo) and (der\_e is Alto) then (ua is 0)
4. If (e is Bajo) and (int\_e is Medio) and (der\_e is Bajo) then (ua is -13.26)
5. If (e is Bajo) and (int\_e is Medio) and (der\_e is Medio) then (ua is -2.058)
6. If (e is Bajo) and (int\_e is Medio) and (der\_e is Alto) then (ua is -0.2681)
7. If (e is Bajo) and (int\_e is Alto) and (der\_e is Bajo) then (ua is -0.001121)
8. If (e is Bajo) and (int\_e is Alto) and (der\_e is Medio) then (ua is 3.845)
9. If (e is Bajo) and (int\_e is Alto) and (der\_e is Alto) then (ua is 5.351)
10. If (e is Medio) and (int\_e is Bajo) and (der\_e is Bajo) then (ua is 2)
11. If (e is Medio) and (int\_e is Bajo) and (der\_e is Medio) then (ua is -33.17)

12. If (e is Medio) and (int\_e is Bajo) and (der\_e is Alto) then (ua is 0)
13. If (e is Medio) and (int\_e is Medio) and (der\_e is Bajo) then (ua is 1.029)
14. If (e is Medio) and (int\_e is Medio) and (der\_e is Medio) then (ua is 0.6948)
15. If (e is Medio) and (int\_e is Medio) and (der\_e is Alto) then (ua is 1.812)
16. If (e is Medio) and (int\_e is Alto) and (der\_e is Bajo) then (ua is 0.02208)
17. If (e is Medio) and (int\_e is Alto) and (der\_e is Medio) then (ua is 3.924)
18. If (e is Medio) and (int\_e is Alto) and (der\_e is Alto) then (ua is 5.208)
19. If (e is Alto) and (int\_e is Bajo) and (der\_e is Bajo) then (ua is 0.5724)
20. If (e is Alto) and (int\_e is Bajo) and (der\_e is Medio) then (ua is -1.345)
21. If (e is Alto) and (int\_e is Bajo) and (der\_e is Alto) then (ua is 0)
22. If (e is Alto) and (int\_e is Medio) and (der\_e is Bajo) then (ua is 0.3829)
23. If (e is Alto) and (int\_e is Medio) and (der\_e is Medio) then (ua is 8.692)
24. If (e is Alto) and (int\_e is Medio) and (der\_e is Alto) then (ua is 0)
25. If (e is Alto) and (int\_e is Alto) and (der\_e is Bajo) then (ua is 2.563)
26. If (e is Alto) and (int\_e is Alto) and (der\_e is Medio) then (ua is -3.671)
27. If (e is Alto) and (int\_e is Alto) and (der\_e is Alto) then (ua is 0)

Por tanto, se ha obtenido todas las reglas de inferencia difusa para el sistema Roble – Secador.

#### **5.4.5. Obtención del Algoritmo de Control Neuro Difuso**

Debemos de resaltar que las salidas de las reglas difusas de la sección 5.4.4 deben de estar restringidos a valores tales que puedan realizar la activación correcta de las válvulas de control y nunca sobrecargarse. Con el fin de evitar dicha sobrecarga, se han agregado saturadores lineales en las salidas.

Además, para poder obtener la derivada y la integral del error del sistema, se hace uso de estimadores de tipo diferencial e integral usando los métodos de aproximación hacia atrás y del trapecio respectivamente.

Aplicando todo esto, se obtiene finalmente el algoritmo de control neuro difuso del presente trabajo el cual se muestra en la figura 122 junto con el sistema Roble – Secador a controlar.



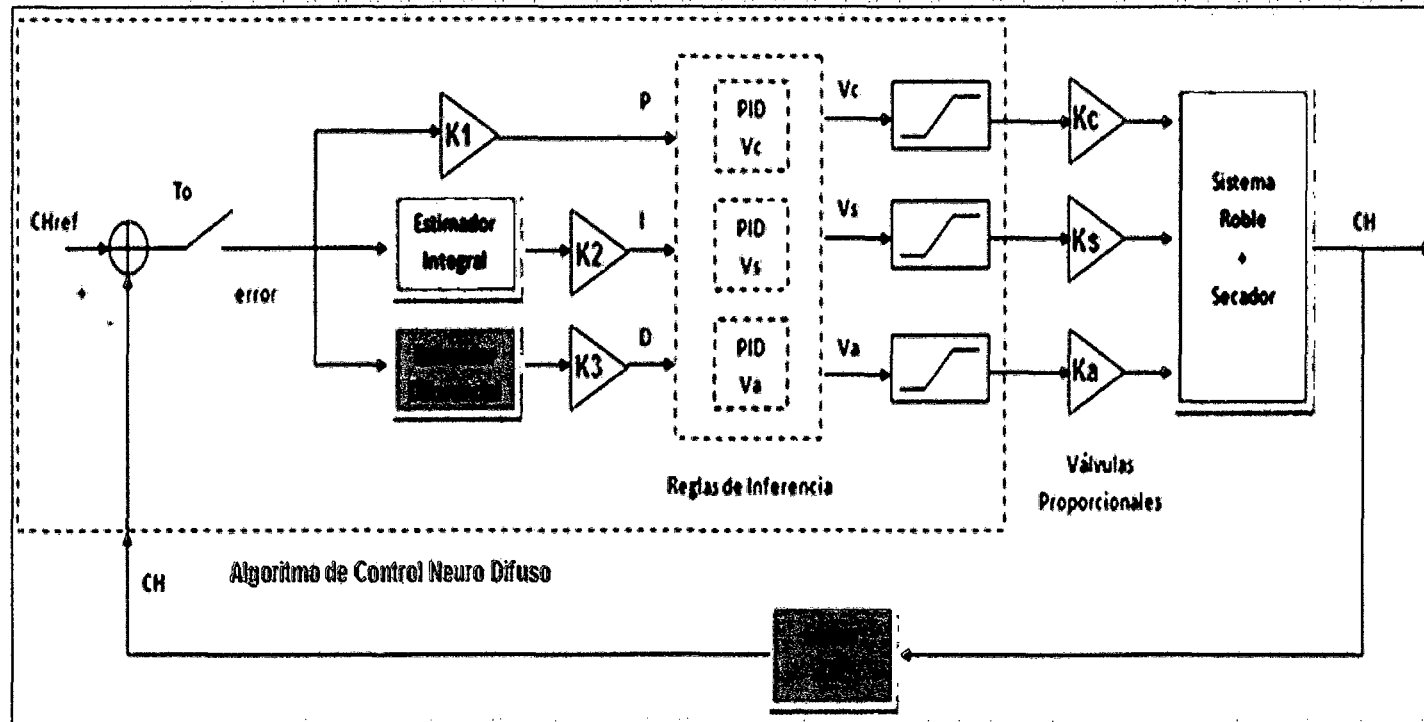


Figura 99. Diagrama de Bloques del Algoritmo de Control Neuro Difuso acoplado a la Planta

## **CAPITULO 6**

### **RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DEL PROCESO DE SECADO**

El presente capítulo tiene como objetivo presentar los resultados obtenidos de la simulación del programa para el proceso de secado de madera acoplado con el algoritmo de control neuro – difuso para corroborar el adecuado funcionamiento de dicho algoritmo observando no solo el Contenido de Humedad deseado sino también otras variables importantes en la determinación de la calidad del secado, donde estos últimos serán usados para validar dichos resultados.

#### **6.1. PRUEBAS REALIZADAS AL ALGORITMO DE CONTROL NEURO DIFUSO**

En la presente sección, se presentan los Contenidos de Humedad obtenidos de la simulación del algoritmo de control neuro difuso acoplado con la planta (roble + secador) para distintos diversos valores de Humedad de Referencia.

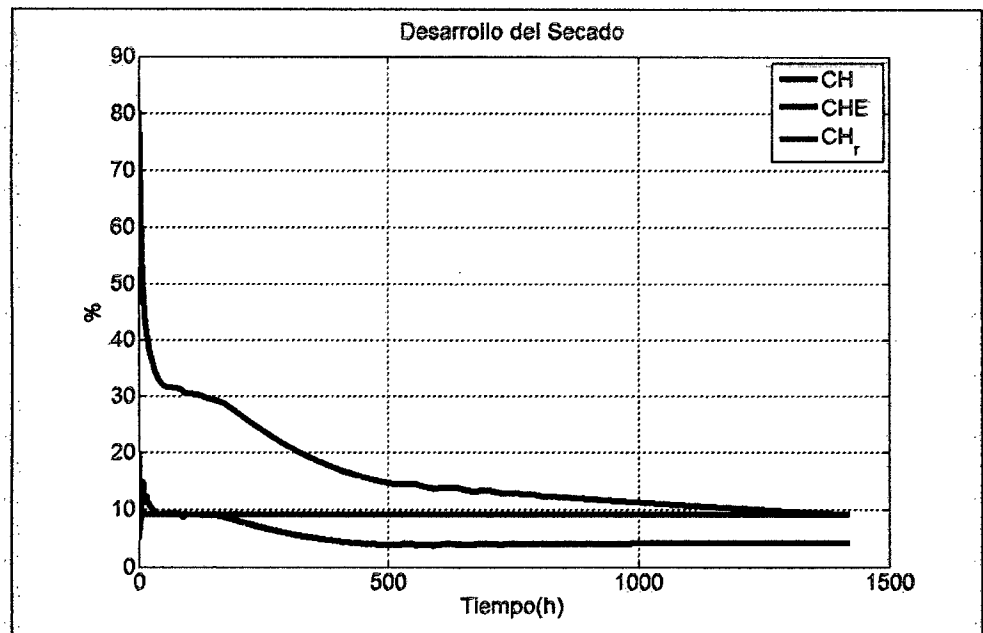
### 6.1.1. Pruebas de Contenido de Humedad y Condiciones de Equilibrio

#### Prueba 1

La presente prueba se realizó con un Contenido de Humedad de referencia de 9% obteniéndose los siguientes resultados:

- Contenido de Humedad Final: 9% (aprox.)
- Tiempo de Secado: 1400 h (58 días aprox.)

Dichos resultados se presentan gráficamente en la figura 100:



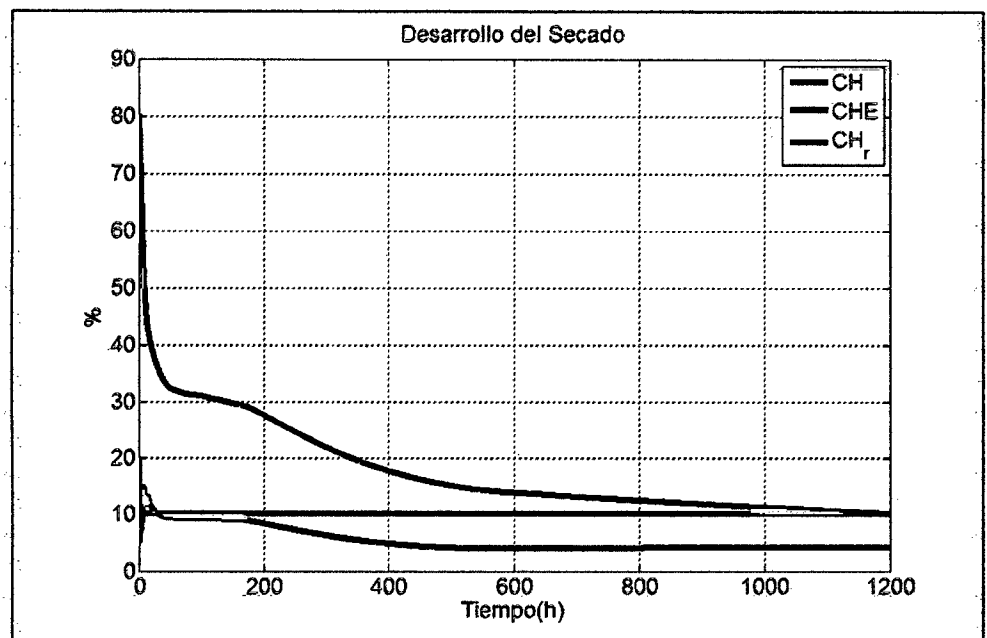
**Figura 100. Contenido de Humedad Final, en Equilibrio y de Referencia obtenidos en la prueba 1**

## Prueba 2

La presente prueba se realizó con un Contenido de Humedad de referencia de 10% obteniéndose los siguientes resultados:

- Contenido de Humedad Final: 10% (aprox.)
- Tiempo de Secado: 1200 h (50 días aprox.)

Dichos resultados se presentan gráficamente en la figura 101:



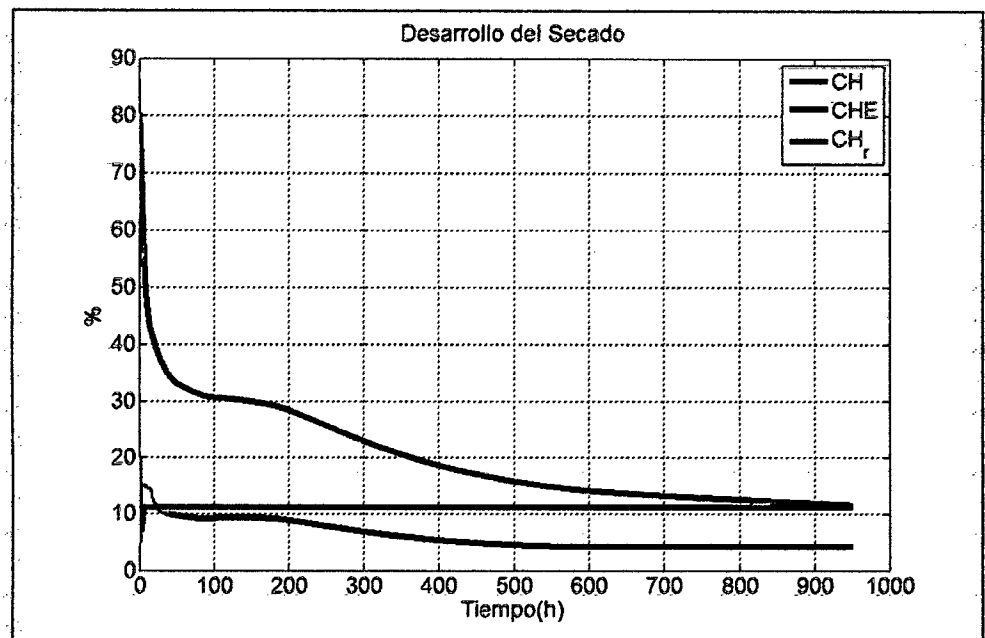
**Figura 101. Contenido de Humedad Final, en Equilibrio y de Referencia obtenidos en la prueba 2**

### Prueba 3

La presente prueba se realizó con un Contenido de Humedad de referencia de 11% obteniéndose los siguientes resultados:

- Contenido de Humedad Final: 11% (aprox.)
- Tiempo de Secado: 960 h (40 días aprox.)

Dichos resultados se presentan gráficamente en la figura 102:



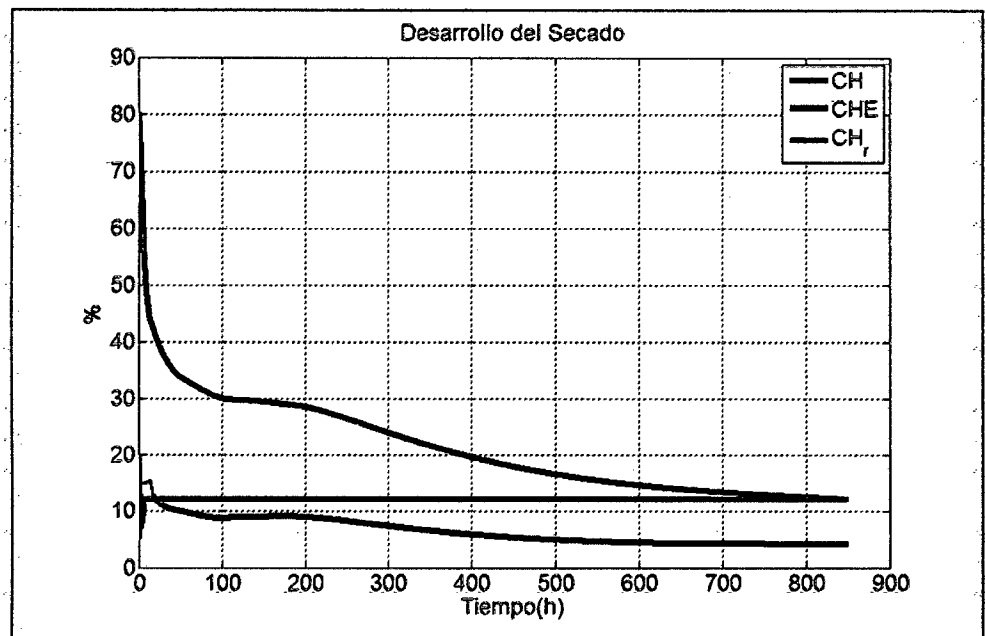
**Figura 102. Contenido de Humedad Final, en Equilibrio y de Referencia obtenidos en la prueba 3**

#### Prueba 4

La presente prueba se realizó con un Contenido de Humedad de referencia de 12% obteniéndose los siguientes resultados:

- Contenido de Humedad Final: 12% (aprox.)
- Tiempo de Secado: 840 h (35 días aprox.)

Dichos resultados se presentan gráficamente en la figura 103:



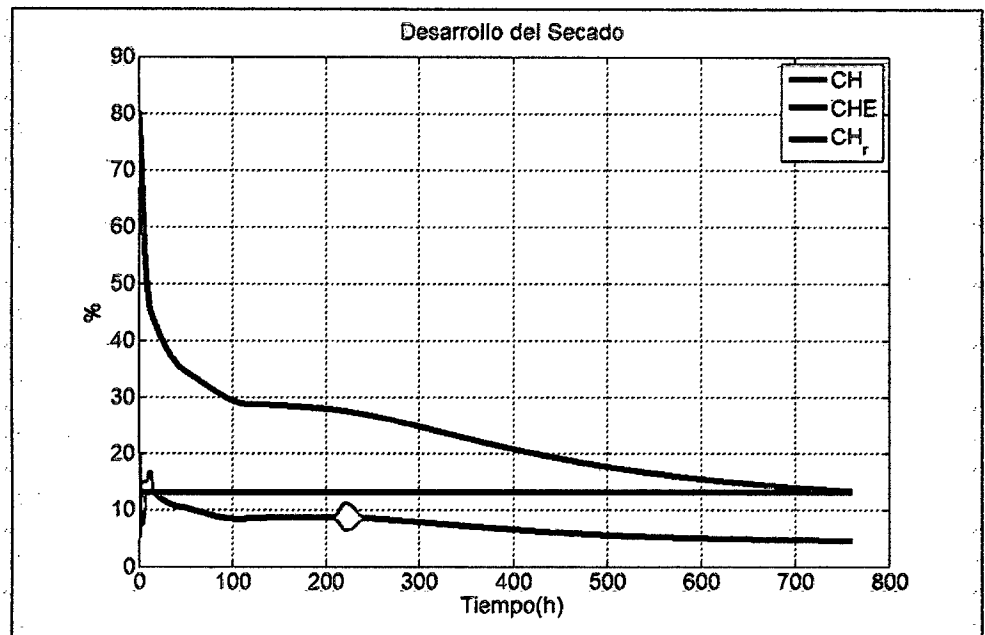
**Figura 103. Contenido de Humedad Final, en Equilibrio y de Referencia obtenidos en la prueba 4**

**Prueba 5**

La presente prueba se realizó con un Contenido de Humedad de referencia de 13% obteniéndose los siguientes resultados:

- Contenido de Humedad Final: 13% (aprox.)
- Tiempo de Secado: 760 h (32 días aprox.)

Dichos resultados se presentan gráficamente en la figura 104:



**Figura 104. Contenido de Humedad Final, en Equilibrio y de Referencia obtenidos en la prueba 5**

### **6.1.2. Discusión de Resultados**

De las pruebas anteriores, se pudo observar que:

- Contenido de Humedad Final: [9 - 13]%
- Tiempo de Secado: [760 – 1400] h

Los cuales caen dentro de los rangos establecidos en la sección 4.3.1; sin embargo, aún no se puede decir que dichos resultados sean los adecuados dado que, como se mencionó en el capítulo 2, no sirve que en un proceso de secado se pierda humedad de forma excesivamente rápida si se generan defectos grandes en la madera ya que esto trae como consecuencia que su calidad sea muy pobre.; por tanto, es necesario hallar indicadores que nos informen sobre la calidad del secado donde esto último será tarea de la siguiente sección.

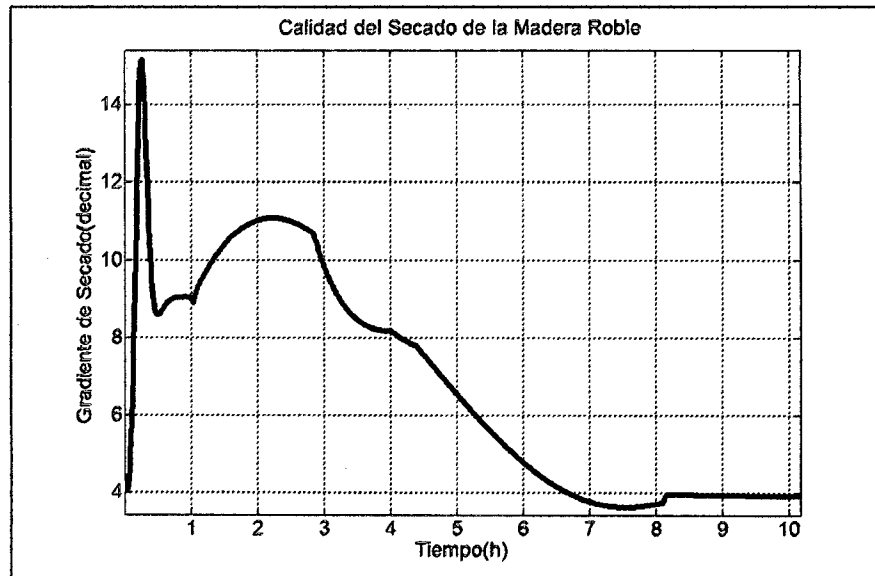
## **6.2. VALIDACIÓN DE RESULTADOS**

Para la validación de resultados, recordemos que, de todas las variables vistas en el presente trabajo, el gradiente de secado de la madera es la que se encuentra estrechamente ligada a la calidad de la madera, tal y como se estableció en el capítulo 2.

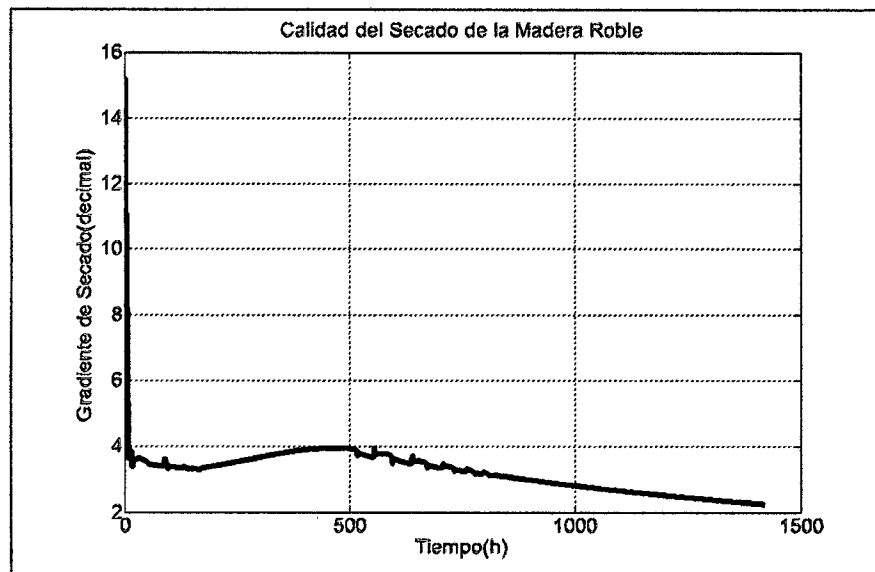
Por tanto, para validar los resultados de la sección anterior, se presentan los gradientes de secado obtenidos en cada prueba realizada y se comparan dichos gradientes con los rangos establecidos en la sección 4.3.1.



En las figuras 105 y 106 se presenta el gradiente de secado durante las primeras horas y durante el proceso completo respectivamente, los cuales se obtuvieron en la prueba 1.



**Figura 105. Gradiente de Secado – Primeras Horas**



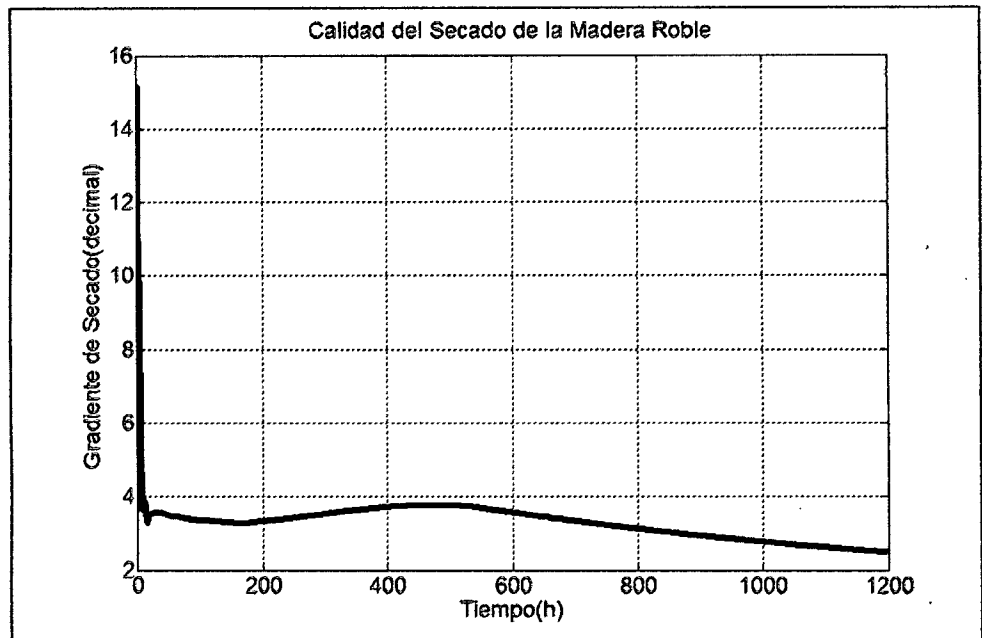
**Figura 106. Gradiente de Secado – Proceso Completo**

De la figura 105, se observa que, durante las primeras horas, el gradiente de secado se encuentra en el rango de 4 a 11 (cabe resaltar que dicho rango se encuentra contenido en el rango establecido en la sección 4.1) lo cual acelera el proceso de secado cuando el contenido de humedad se encuentra por encima del punto de saturación de las fibras.

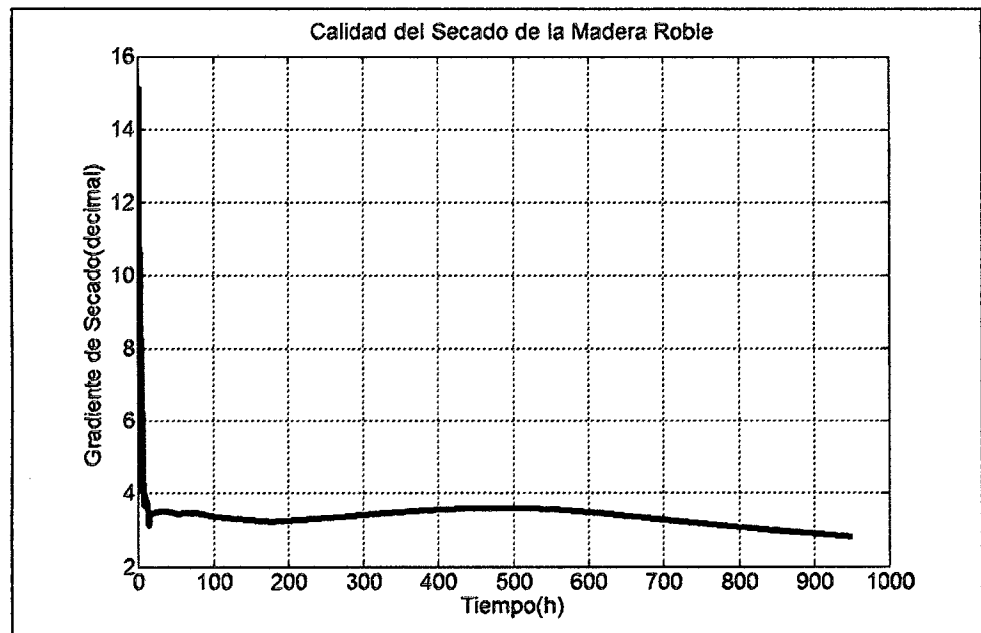
De la figura 106, se observa que, durante el resto del proceso, el gradiente de secado se encuentra en el rango de 2 a 4 (cabe resaltar que dicho rango se encuentra contenido en el rango establecido en la sección 4.1) lo cual da como resultado un proceso moderado cuando el contenido de humedad se encuentra por debajo del punto de saturación de las fibras asegurando la mínima existencia de defectos.

Por tanto, el proceso de secado realizado en la prueba 1 de la anterior anterior no solo garantiza una rápida pérdida de humedad del roble sino también garantiza que la calidad de dicha madera al final del proceso sea la adecuada.

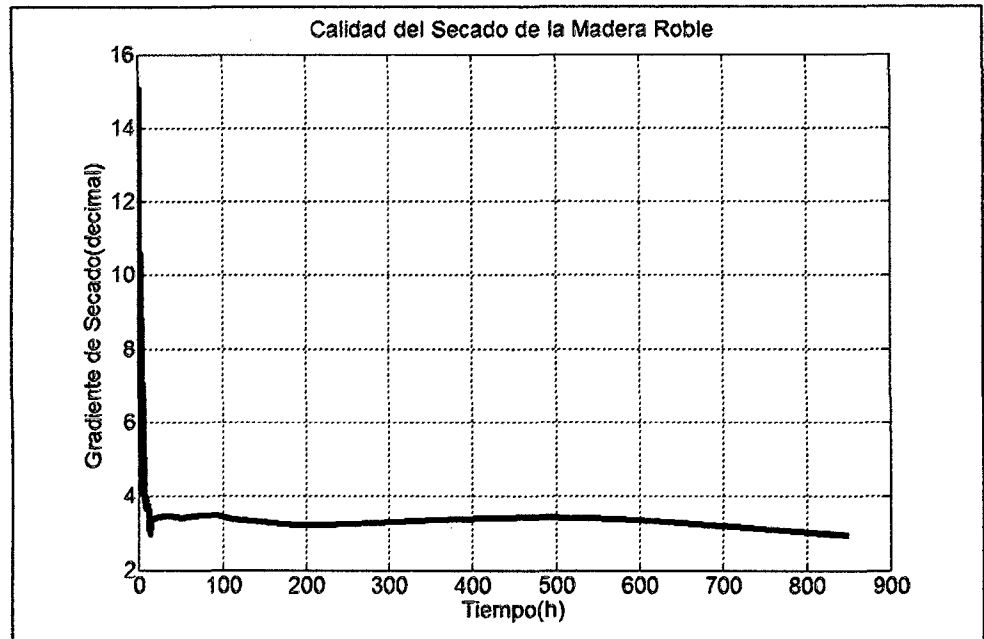
Para finalizar, se debe resaltar que las características descritas para el gradiente de secado de la prueba 1 también se cumplen desde las pruebas 2 y 5 de la sección anterior tal y como se muestra desde la figura 107 hasta la figura 110 garantizando así que la calidad de la madera siempre sea el adecuado en todas las pruebas realizadas.



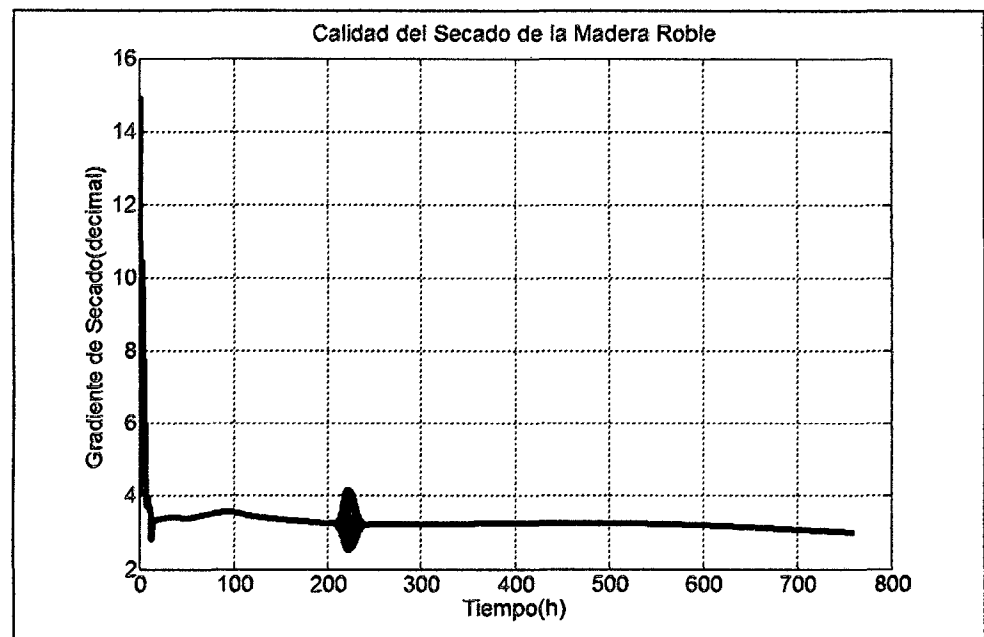
**Figura 107. Gradiente de Secado de la Prueba 2**



**Figura 108. Gradiente de Secado de la Prueba 3**



**Figura 109. Gradiante de Secado de la Prueba 4**



**Figura 110. Gradiante de Secado de la Prueba 5**

## CONCLUSIONES

1. El algoritmo de control neuro difuso diseñado, en todas las pruebas realizadas, alcanza siempre el Contenido de Humedad de Referencia deseado.
2. Se observa que, en todas las pruebas realizadas en el capítulo 6, los tiempos de secado se encuentran siempre dentro del rango de 700 a 1500 horas garantizando que sea siempre se realice el proceso de secado más rápido.
3. En todas las pruebas realizadas en el capítulo 6, se observó que el gradiente de secado se mantiene dentro del intervalo de [4.5 - 20] cuando su Contenido de Humedad está por encima del Punto de Saturación de las Fibras y en el intervalo de [2.5 - 4.5] cuando su Contenido de Humedad está por debajo del Punto de Saturación de las Fibras garantizado que la calidad del proceso de secado sea el más adecuado.
4. Se logró diseñar un algoritmo de control capaz de llevar a cabo un proceso de secado rápido manteniendo las especificaciones establecidas al inicio del trabajo; sin embargo, no se analizaron otras condiciones como por ejemplo la aparición de esfuerzos durante dicho proceso, lo cual es determinante en la apariencia final de la madera, muy importante en mueblería pero intrascendente en la construcción de vigas.

**BIBLIOGRAFÍA**

- [1] Adin Berberović. **Numerical Simulation of Wood Drying**. Department of Wood Science and Engineering, Oregon State University, Estados Unidos, 24 de Mayo, 2007.
- [2] Adin Berberović. **The Impact of Wood Variability on the Drying Rate at Different Moisture Content Levels**. Department of Wood Science and Engineering, Oregon State University, Estados Unidos, 15 de Julio, 2010.
- [3] Ahmad M. Ibrahim. **Fuzzy Logic for Embedded Systems Applications**. Editorial Newnes, 2004.
- [4] Bonifacio Martín del Brío, Alfredo Sanz Molina. **Redes Neuronales y Sistemas Difusos**. Editorial RA-MA, Segunda Edición, 2001.
- [5] Charles D. Ray, Neelesh Gattani, Enrique del Castillo y Paul Blankenhorn. **Time series techniques for dynamic, real-time control of wood-drying processes**. *Forest Products Journal*, Octubre, 2005.
- [6] Francisco Pedras Saavedra. **Secado de la Madera: Recomendaciones Prácticas**. Cis-Madera, Área de Innovación y Tecnología, Chile.
- [7] Frank Kreith, Mark S. Bohn. **Principios de Transferencia de Calor**. Editorial Thompson Learning, Sexta Edición, 2001.
- [8] **Fuzzy Logic Toolbox For Use with MATLAB - User's Guide, Version 2**.
- [9] Hasmah Mansor, Samsul Bahari Mohd Noor, Raja Mohd Kamil Raja Ahmad, Farah Saleena Taip y Omar Farouq Lutfi. **Fuzzy Control of Grain Drying**

**Process.** 11th International Conference on Computer Modelling and Simulation, 2009.

- [10]<http://ohm.utp.edu.co:16080/neuronales/main.htm>. **Redes Neuronales.** Facultad de Ingenierías Física, Eléctrica, Electrónica y Ciencias de la Computación, Grupo de Investigación en Inteligencia Artificial, Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia.
- [11]<http://www.ujaen.es/dep/fisica/lec4.pdf>. **Termodinámica del Aire Húmedo.** Departamento de Física, Universidad de Jaén, España.
- [12]Javier Antonio Falcón Cisneros. **Modelamiento, Simulación y Automatización de una Cámara de Secado de Madera.** Centro de Energías Renovables de la Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú, Julio 2007.
- [13]John Yen, Reza Langari. **FUZZY LOGIC: Intelligence, Control and Information.** Editorial Pearson Education, 2003.
- [14]Joseph Denig, Eugene M. Wengert, William T. Simpson. **Drying Hardwood Lumber.** Forest Products Laboratory, United States Department of Agriculture, Estados Unidos, Setiembre 2000.
- [15]Katsuhiko Ogata. **Ingeniería de Control Moderna.** Editorial Pearson Education, Cuarta Edición, 2003.
- [16]Lennart Ljung. **System Identification Toolbox - Getting Started Guide R2008b.**
- [17]Li Wei. **Artificial Neural Networks for Quality Control of Seam Pucker on Textiles.** The University of Hong Kong, China, Agosto, 2008.

- [18] M. Nawshadul Haque. **Modelling of Solar Kilns and the Development of an Optimised Schedule for Drying Hardwood Timber**. Department of Chemical Engineering, The University of Sydney, Australia, 2006.
- [19] Mario Fuentes Salinas. **Importancia de Conocer el Contenido de Humedad en la Madera**. Consejo Nacional de la Madera en la Construcción, México.
- [20] O. Allegretti, A. Bagolini, B. Margesin y L. Travan. **A Sensor to Measure Wood Stress During the Drying Process**. 9th International IUFRO Wood Drying Conference, Italia, 2005.
- [21] Octavio López Gómez, Héctor Rojas León, Raúl Gonzales Flores, Jesús Conejos Sobrino. **Manual del grupo andino para el secado de maderas**. Junta del acuerdo de Cartagena, Lima, Perú, 1989.
- [22] Patrice Chanrion y Alain Davesne. **El Secado al Aire Libre: ¿Conoce Usted el Coste?** CTBA – INFO, Francia.
- [23] Rubén A. Ananías, Sergio Vallejos y Carlos Salinas. **Estudio de la cinética del secado convencional y bajo vacío del pino radiata**. Maderas, Ciencia y tecnología, Concepción, Chile, 2005.
- [24] Sachin Agrahari. **A Performance Comparison of PID, FLC & MPC Controller: A Comparative Case Study**. Department of Electrical and Instrumentation Engineering, Thapar University, Patiala, India, Julio, 2009.
- [25] Samuel H. Marón. **Fundamentos de Físicoquímica**. Edición LIMUSA.
- [26] Sandhya Samarasinghe, Don Kulasiri, Triston Jamieson. **Neural Networks for Predicting Fracture Toughness of Individual Wood Samples**. Silva Fennica, 2007.



- [27] Silverio Viscarra. **Guía para el Secado de la Madera en Hornos**. Chemonics International, Bolivia, Agosto 1998.
- [28] Víctor Hugo Gutiérrez Rojas, Julio Silva Sandoval. **Información Técnica para el Procesamiento Industrial de 134 Especies Maderables de Bolivia**. HIB - Latinoamericana, Santa Cruz, Bolivia, 1º Edición.
- [29] Yunus A. Cengel, Michael A. Boles. **Termodinámica**. Editorial McGraw-Hill Interamericana, Cuarta Edición, 2003.
- [30] Zhiyong Cai. **A new method of determining moisture gradient in wood**. Forest Products Journal, Volumen 58, No. 7. Estados Unidos, Agosto, 2008.

# ANEXOS

## Programas para la Simulación del Sistema Roble - Secador

### Constantes.m

```
%programa que sirve para introducir las constantes para la simulacion
To = 0.01;%h
e = 1.863;
V_da = 59.8558;%m^3
Ro_da = 1.2;%Kg/m^3
Cp_da = 1.005;%Kj/Kg^oK
P_dw = 2746.55;%Kg
Cp_dw = 1.3556;%Kj/Kg^oK
Cv = 1.8723;%Kj/Kg^oK
Cw = 4.18;%Kj/Kg^oK
Hv = 2.3274e3;%Kj/Kg
delta_h = 2169.2008;%Kj/Kg
hg = 2779.0782;%Kj/Kg
R = 10000;%h^oK/Kj
Ta_ent = 288.2139;%K
Wa_ent = 8.9428*(10^-3);%Kg_w/Kg_da
ha_ent = 37.6867;%Kj/Kg_da
A = 618.3626;%m^2
L = 2.4384;%m
Pa = 14.69543;%PSI
```

### f\_1.m

```
function y = f_1(u)
%funcion que se encarga de hallar la entalpia del agua liquida saturada
%teniendo como entrada la temperatura a la que se encuentra (en ^oK)
y = 1.0277*(10^-5)*(u^3)-1.1098*(10^-2)*(u^2)+8.1486*u-1.61*(10^3);
```

### f\_2.m

```
function y = f_2(u)
%funcion que se encarga de hallar la entalpia vaporizacion del agua
%teniendo como entrada la temperatura a la que se encuentra (en ^oK)
y = -3.1749*(10^-5)*(u^3)+3.27*(10^-2)*(u^2)-13.6312*u+4.4397*(10^3);
```

### f\_3.m

```
function y = f_3(u)
%funcion que se encarga de hallar la entalpia del vapor de agua saturado
%teniendo como entrada la temperatura a la que se encuentra (en ^oK)
y = -2.1477*(10^-5)*(u^3)+2.1607*(10^-2)*(u^2)-5.4849*u+2.8301*(10^3);
```

**f\_4.m**

```

function y = f_4(u)
%funcion que se encarga de hallar la entalpia del aire humedo, teniendo
%como entradas a la temperatura (en °K) y la humedad absoluta (Kgw/Kgda)
%la salida esta expresado en KJ/Kgda
Ta = u(1);
%pasamos la temperatura de °K a °C
Ta = Ta-273.15;
wa = u(2);
y = Ta+wa*(2501.4+1.88*Ta);

```

**f\_5.m**

```

function y = f_5(u)
%funcion que calcula la presion del vapor de agua en el aire, en PSI
%teniendo como entrada a la Humedad Especifica en Kg_w/Kg_da
constantes
Wa = u;
y = Pa*Wa/(0.62198+Wa);

```

**f\_6.m**

```

function y = f_6(u)
%funcion que se encarga de hallar la presion de vapor saturado del agua,
%en PSI, teniendo como entrada la temperatura del aire en °K
Ta = u;
C1 = 181.6796;
C2 = -9.6202*(10^3);
C3 = -29.5367;
C4 = 7.0856*(10^-2);
C5 = -3.4398*(10^-5);
y = exp(C1+C2/Ta+C3*log(Ta)+C4*Ta+C5*Ta^2);

```

**f\_7.m**

```

function y = f_7(u)
%funcion que se encarga de hallar la humedad relativa del aire
%teniendo como entrada la temperatura (°K) y la humedad absoluta (Kgw/Kgda)
Ta = u(1);
Wa = u(2);
Pv = f_5(Wa);
Pvs = f_6(Ta);
y = 100*(Pv/Pvs);

```

**f\_8.m**

```

function y = f_8(u)
%programa para hallar el CHE de la madera teniendo como entradas la
%temperatura (°K) y la Humedad Relativa (%) del ambiente
T = u(1);
%Pasamos la temperatura de °K a °C
T = T -273.15;
HR = u(2);
%Pasamos la humedad relativa de % a decimal
HR = HR/100;
%Humedad Relativa (decimal)
%Contenido de Humedad en Equilibrio (%)
K1 = 4.737+0.0477*T-0.00063*(T^2);
K2 = 0.7095+0.0017*T-6.78*(10^-6)*(T^2);
K3 = 223.385+0.6492*T+0.0185*(T^2);
a = K1*K2*HR/(1+K1*K2*HR);
b = K2*HR/(1-K2*HR);
y = (1778/K3)*(a+b);

```

**f\_10.m**

```

function y = f_10(u)
%funcion que se encarga de hallar la humedad especifica de saturacion
constantes
Ta = u;
Pvs = f_6(Ta);
y = 0.62198*Pvs/(Pa-Pvs);

```

**limit\_W.m**

```

function y = limit_W(u)
%funcion que se encarga de restringir los valores de la humedad especifica
%del aire; recordemos que, para una determinada temperatura, el aire solo
%podra absorber una cantidad determinada de agua donde el sobrante
%simplemente se condensa
Ta = u(1);
Wa = u(2);
constantes
Ws = f_10(Ta);
if Ws<=Wa
    m_we = (Wa-Ws)*V_da*Ro_da;
    dm_we = (m_we/To);
    Wa = Ws;
else
    m_we = 0;

```

```

dm_we = 0;
if Wa<0
    Wa = 0;
end
end
y = [Wa m_we dm_we];

```

### datos.m

Programa que se encarga de graficar y almacenar los datos para la estimación de la función de transferencia correspondiente a la cinética del secado de la madera y para la validación de la fórmula del contenido de humedad en equilibrio.

```

clear all
close all
clc
load data
t = data(:,1);
To = t(2)-t(1);
T = data(:,2);
HR = data(:,3);
CHE = data(:,4);
CH = data(:,5);
%graficamos los datos obtenidos
figure
plot(t,T-273.15,'r')
grid on
hold on
plot(t,HR,'g')
plot(t,CHE,'b')
plot(t,CH,'k')
title('Curva de Secado Completa')
xlabel('Tiempo(h)')
legend('Temperatura(°)', 'Humedad Relativa(%)', 'Contenido de Humedad en
Equilibrio(%)', 'Contenido de Humedad(%)')
u = [T HR];
y = CH;
ze = iddata(y(1:2300),u(1:2300,:),To,'InputName',{'Temperatura','Humedad
Relativa'}, 'InputUnit',{'°K','%'}, 'OutputName','Contenido de
Humedad', 'OutputUnit','%','TimeUnit','h');
%zv =
%iddata(y(4601:9201),u(4601:9201,:),To,'InputName',{'Temperatura','Humedad
Relativa'}, 'InputUnit',{'°C','%'}, 'OutputName','Contenido de
Humedad', 'OutputUnit','%','TimeUnit','h');

```

```

exp = iddata(y,u,To,'InputName',{'Temperatura','Humedad
Relativa'},'InputUnit',{'°K','%'},'OutputName','Contenido de
Humedad','OutputUnit','%','TimeUnit','h');
save data.mat data
save exp.mat exp

```

### **prueba5.m**

Programa que se encarga de validar la ecuación correspondiente al contenido de humedad en equilibrio de la madera comparandolo con los datos experimentales obtenidos.

```

clear all
close all
clc
load data_2
t = data_2(:,1);
T = data_2(:,2);
HR = data_2(:,3);
CHE_1 = data_2(:,4);
[n,m]=size(data_2);
for i=1:n
    y(i)=CHE(T(i)-273.15,HR(i));
end
y = y';
plot(t,CHE_1,'r')
grid on
hold on
plot(t,y,'g')
title('Formula para el Contenido de Humedad de Equilibrio')
ylabel('Contenido de Humedad en Equilibrio')
legend('De los Datos','De la Formula')
e = 100*(y-CHE_1)./CHE_1;
%e = y-CHE_1;
figure
plot(t,e)
grid on
title('Error existente')
ylabel('Error Relativo(%')
%ylabel('Error Absoluto')

```

### **datos8.m**

Programa que se encarga de estimar el modelo matemático correspondiente a la cinética del secado de la madera a partir de los datos experimentales obtenidos y apoyándose en el toolbox de Identificación de Sistemas

```

clear all
close all
clc
%cargamos los datos experimentales para estimar la relacion entre el
%contenido de humedad y el contenido de humedad en equilibrio
load exp_2
load data
To = data(2,1)-data(1,1);
%graficamos los datos obtenidos respecto al tiempo
plot(exp_2)
Ge = spa(exp_2);
%realizamos el analisis en frecuencia de nuestra planta
figure
bode(Ge)
%graficamos la respuesta al escalon de nuestra planta
figure
step(Ge,15)
grid on
%comenzamos con la estimacion de la funcion de transferencia de nuestra
%planta
%de todas las pruebas realizadas, la que más se aproxima es una planta de
%tercer orden con un zero
midproc0 = idproc('P3Z');
midproc = pem(exp_2,midproc0);
midproc1 = pem(exp_2,midproc,'SearchMethod','lm')
%mejoramos nuestro modelo estimado a partir del modelo obtenido
%anteriormente
midproc2 = pem(exp_2,midproc1,'SearchMethod','lm')
%estimamos el modelo de la planta junto con el ruido blanco presente
midproc3 = pem(exp_2,midproc0,'DisturbanceModel','arma2')
figure
%comparamos los diferentes modelos obtenidos
compare(exp_2,midproc,midproc1,midproc2,midproc3)
grid on
%Pasamos la funcion de transferencia obtenida a su representacion en
%espacio estado dado que esta depende de las condiciones iniciales
%Para nuestra representacion, consideraremos las siguientes variables
%internas: x1 = CH; x2 = dCH x3 = d2CH - 0.1237*CHE
A = [0 1 0;0 0 1;-5.264e-5 -6.296e-2 -0.501];
B = [0;0.1237;-6.1926e-2];
C = [1 0 0];
D = 0;
G = ss(A,B,C,D);
%de lo anterior, calculamos nuestro vector de estado inicial
x0 = [80.3121;0;-1.8-0.1237*17.6481];
t = data(:,1);
CHE = data(:,4);

```



```

CH = data(:,5);
%simulamos la planta obtenida
[y,t,x] = lsim(G,CHE,t,x0);
figure
plot(t/24,CH,'r')
grid on
hold on
plot(t/24,y,'g')
plot(t/24,CHE,'k')
xlabel('Tiempo(dias)')
ylabel('Contenido de Humedad(%)')
title('Comparacion del Modelo con los datos')
legend('de los datos','del modelo estimado','CHE')
figure
plot(t/24,-x(:,2),'r')
grid on
xlabel('Tiempo(dias)')
ylabel('Derivada del Contenido de Humedad(%/h)')
title('Rapidez de secado asociado con el modelo estimado')
clear CHE CH t x x0 y
t = 0:0.2:2400;
t = t';
n = length(t);
x0 = [80.3121;0;-1.8-0.1237*30];
CHE = 30*ones(n,1);
[y,t,x] = lsim(G,CHE,t,x0);
figure
plot(t/24,y,'r')
grid on
hold on
plot(t/24,CHE,'g')
xlabel('Tiempo(dias)')
ylabel('Contenido de Humedad(%)')
title('Validacion del Modelo Obtenido')
legend('CH','CHE')
figure
plot(t/24,-x(:,2),'r')
xlabel('Tiempo(dias)')
ylabel('Derivada del Contenido de Humedad(%/h)')
title('Rapidez de secado asociado con el modelo')
grid on
save G.mat G

```

**Prueba12.m**

Programa que se encarga de probar las ecuaciones en espacio estado correspondientes a la cinetica de secado de la madera probado a diferentes tasas de muestreo.

```

clear all
close all
clc
load data
load data_2
%Para nuestra representacion, consideraremos las siguientes variables
%internas: x1 = CH; x2 = dCH  x3 = d2CH - 0.1237*CHE
A = [0 1 0;0 0 1;-5.264e-5 -6.296e-2 -0.501];
B = [0;0.1237;-6.1926e-2];
C = [1 0 0];
D = 0;
G = ss(A,B,C,D);
%de lo anterior, calculamos nuestro vector de estado inicial
x0 = [80.3121;0;-1.8-0.1237*17.6481];
%simulacion con un tiempo de muestreo de 0.2h
t_1 = data(:,1);
CHE_1 = data(:,4);
CH_1 = data(:,5);
[y_e_1,t_1,x_1] = lsim(G,CHE_1,t_1,x0);
%simulacion con un tiempo de muestreo de 0.01h
t_2 = data_2(:,1);
CHE_2 = data_2(:,4);
CH_2 = data_2(:,5);
[y_e_2,t_2,x_2] = lsim(G,CHE_2,t_2,x0);
%pasamos a hacer la simulacion tomando muestras cada cierto tiempo
%recordemos la representacion en espacio estado generica en tiempo continuo
%dX_dt = AX + BU
%Usamos una aproximacion de la derivada y pasando a tiempo discreto, tenemos:
%X[k+1] = A'X[k]+B'U[k], donde:
%A' = A*To+I y B' = B*To
%Donde:
%To: Tiempo de muestreo de los datos
%I: Matriz Identidad de Orden n (para nuestro caso n = 3)
I = eye(3);
%Probamos primero para To = 0.2h
To = 0.2;%h
A_1 = A*To+I;
B_1 = B*To;
n_1 = length(t_1);
%definimos un vector de estado en tiempo discreto
xd_1 = zeros(n_1,3);
%definimos un vector de estado actual

```

```

xact_1 = x0;
for i=1:n_1
    xsig_1 = A_1*xact_1+B_1*CHE_1(i);
    xact_1 = xsig_1;
    xd_1(i,:) = xsig_1';
end
%Probamos primero para To = 0.01h
To = 0.01;%h
A_2 = A*To+I;
B_2 = B*To;
n_2 = length(t_2);
%definimos un vector de estado en tiempo discreto
xd_2 = zeros(n_2,3);
%definimos un vector de estado actual
xact_2 = x0;
for i=1:n_2
    xsig_2 = A_2*xact_2+B_2*CHE_2(i);
    xact_2 = xsig_2;
    xd_2(i,:) = xsig_2';
end
%pasamos a graficar los resultados obtenidos respecto al tiempo
plot(data(:,1),data(:,5),'r')
grid on
hold on
plot(t_1,y_e_1,'g')
plot(t_2,y_e_2,'k')
xlabel('Tiempo(h)')
ylabel('Contenido de Humedad(%)')
title('Uso del Modelo con diferentes tiempo de muestreo')
legend('De los datos','con To = 0.2','con To = 0.01')
figure
plot(t_1,x_1(:,1),'r')
grid on
hold on
plot(t_2,x_2(:,1),'g')
plot(t_1,xd_1(:,1),'b')
plot(t_2,xd_2(:,1),'k')
xlabel('Tiempo(h)')
ylabel('Contenido de Humedad(%)')
title('Variable de Estado 1')
legend('Continuo con To = 0.2','Continuo con To = 0.01','Discreto con To =
0.2','Discreto con To = 0.01')
figure
plot(t_1,x_1(:,2),'r')
grid on
hold on
plot(t_2,x_2(:,2),'g')

```

```

plot(t_1,xd_1(:,2),'b')
plot(t_2,xd_2(:,2),'k')
xlabel('Tiempo(h)')
ylabel('Contenido de Humedad(%)')
title('Variable de Estado 2')
legend('Continuo con To = 0.2','Continuo con To = 0.01','Discreto con To =
0.2','Discreto con To = 0.01')
figure
plot(t_1,x_1(:,3),'r')
grid on
hold on
plot(t_2,x_2(:,3),'g')
plot(t_1,xd_1(:,3),'b')
plot(t_2,xd_2(:,3),'k')
xlabel('Tiempo(h)')
ylabel('Contenido de Humedad(%)')
title('Variable de Estado 3')
legend('Continuo con To = 0.2','Continuo con To = 0.01','Discreto con To =
0.2','Discreto con To = 0.01')

```

### **simulacion\_10.m**

Programa que se encarga de realizar la simulación correspondiente a la cinética de secado de la madera y del acondicionamiento del aire dentro del secador para posteriormente hallar el error, la integral del error y la derivada del error del contenido de humedad de la madera y de los flujos masicos de vapor de la caldera, de los aspersores y del aire de los ductos de ventilación para ser usados para el diseño del algoritmo de control difuso de tipo sugeno.

```

clear all
close all
clc
To = 0.01;
constantes
load dm_a
load dm_cal
load dm_asp
t = 0:To:920;
t = t';
n = length(t);
xact = [288.2139;8.9428e-3;80.3121;0;-1.8-0.1237*18.7116;288.2139];
u_asp = zeros(n,1);
u_cal = zeros(n,1);
u_a = zeros(n,1);
error = zeros(n,1);
d_error = zeros(n,1);
int_error = zeros(n,1);

```

```

CH = zeros(n,1);
dCH = zeros(n,1);
dm_ww = zeros(n,1);
dm_we = zeros(n,1);
m_we = zeros(n,1);
x = zeros(n,6);
Ws = zeros(n,1);
HR = zeros(n,1);
CHE = zeros(n,1);
GS = zeros(n,1);
ant = 0;
for i = 1:n
    dm_ww(i) = -(P_dw/100)*xact(4);
    u = [dm_cal(i);dm_asp(i);dm_a(i);dm_ww(i);dm_we(i);xact];
    delta_x = [dx_1(u);dx_2(u);dx_3(u);dx_4(u);dx_5(u);dx_6(u)];
    x(i,:) = xact+delta_x*To;
    %bloque de programa que se encarga de limitar la salida
    %de la variable de estado 1 correspondiente a la temperatura del aire
    if x(i,1)<273.15
        x(i,1) = 273.15;
    end
    %bloque de programa que se encarga de limitar la salida
    %de la variable de estado 2 correspondiente a la humedad especifica del
    %aire
    aux = limit_W(x(i,1:2));
    x(i,2) = aux(1);
    m_we(i) = aux(2);
    dm_we(i) = aux(3);
    %bloque de programa que se encarga de limitar la salida
    %de la variable de estado 6 correspondiente a la temperatura de la
    %madera
    if x(i,6)<273.15
        x(i,6) = 273.15;
    end
    HR(i) = f_7(x(i,1:2));
    CHE(i) = f_8([x(i,1) HR(i)]);
    GS(i) = x(i,3)/CHE(i);
    x(i,3) = x(i,3)+(100/P_dw)*m_we(i);
    xact = x(i,:);
end
CH = x(:,3);
dCH = x(:,4);
subplot(311)
plot(t,dm_cal,'r')
grid on
xlabel('Tiempo(h)')
ylabel('Flujo Masico (Kg/h)')

```

```

title('Flujo Masico de la caldera')
subplot(312)
plot(t,dm_asp,'g')
grid on
xlabel('Tiempo(h)')
ylabel('Flujo Masico (Kg/h)')
title('Flujo Masico de los Aspersores')
subplot(313)
plot(t,dm_a,'b')
grid on
xlabel('Tiempo(h)')
ylabel('Flujo Masico (Kg/h)')
title('Flujo Masico de Aire')
figure
plot(t,x(:,1)-273.15,'r')
grid on
hold on
plot(t,x(:,6)-273.15,'g')
xlabel('Tiempo(h)')
ylabel('Temperatura(°C)')
title('Comparacion de Temperaturas')
legend('Del Aire dentro del Secador','De la madera')
figure
subplot(211)
plot(t,HR,'r')
grid on
xlabel('Tiempo(h)')
ylabel('Humedad Relativa(%))')
subplot(212)
plot(t,x(:,1)-273.15,'g')
grid on
xlabel('Tiempo(h)')
ylabel('Temperatura(°C)')
figure
plot(t,x(:,3),'r')
grid on
hold on
plot(t,CHE,'g')
xlabel('Tiempo(h)')
ylabel('%')
title('Desarrollo del Secado')
legend('CH','CHE')
figure
subplot(211)
plot(t,dm_ww,'r')
grid on
xlabel('Tiempo(h)')

```

```

ylabel('Flujo Masico(Kg/h)')
title('Flujos Masico de Ganancia de Agua en el aire')
subplot(212)
plot(t,dm_we,'g')
grid on
xlabel('Tiempo(h)')
ylabel('Flujo Masico(Kg/h)')
title('Flujos Masico de Perdida de Agua en el aire')
figure
plot(t,GS,'r')
grid on
xlabel('Tiempo(h)')
ylabel('Gradiente de Secado(decimal)')
title('Calidad del Secado de la Madera Roble')
error = min(CH)-CH;
d_error = -dCH;
%calculamos la integral del error del contenido de humedad haciendo uso del
%metodo del trapecio
for i = 1:n-1
    int_error(i) = 5e-3*(error(i+1)+error(i))+ant;
    ant = int_error(i);
end
int_error(n)=int_error(n-1);
figure
subplot(311)
plot(t,error,'r')
grid on
xlabel('Tiempo(h)')
ylabel('error(%)')
title('Error del Contenido de Humedad de la Madera')
subplot(312)
plot(t,int_error,'g')
grid on
xlabel('Tiempo(h)')
ylabel('Integral del error')
title('Integral del Error del Contenido de Humedad de la Madera')
subplot(313)
plot(t,d_error,'b')
grid on
xlabel('Tiempo(h)')
ylabel('Derivada del error(%/h)')
title('Derivada del Error del Contenido de Humedad de la Madera')
u_esp = 5*dm_esp/max(dm_esp);
u_cal = 5*dm_cal/max(dm_cal);
u_a = 5*dm_a/max(dm_a);
figure
subplot(311)

```

```

plot(t,u_cal,'r')
grid on
xlabel('Tiempo(h)')
ylabel('Voltaje(V)')
title('electrovalvula proporcional para la caldera')
subplot(312)
plot(t,u_asp,'g')
grid on
xlabel('Tiempo(h)')
ylabel('Voltaje(V)')
title('electrovalvula proporcional para los aspersores')
subplot(313)
plot(t,u_a,'b')
grid on
xlabel('Tiempo(h)')
ylabel('Voltaje(V)')
title('electrovalvula proporcional para los ductos de ventilacion')
%De los graficos se observa que el desarrollo de secado es adecuado
%Procedemos a almacenar los valores obtenidos de dm_cal, dm_asp y dm_a
%junto con los valores de e_CH, de_CH e int_e_CH para usarlos en el diseño
%del controlador difuso
%data_17 = [t error int_error d_error u_cal u_asp u_a];
%save data_17.mat data_17
%data_18 = [t error int_error d_error u_cal u_asp u_a];
%save data_18.mat data_18

```

### **simulacion\_final.m**

Programa que se encarga de realizar la simulación correspondiente a la cinética de secado de la madera, del acondicionamiento del aire dentro del secador y de la acción del algoritmo de control difuso de tipo sugeno diseñado a partir de los datos obtenidos del programa simulacion\_10.

```

clear all
close all
clc
constantes
t = 0:To:1420;
t = t';
n = length(t);
%definimos las constantes para las valvulas y los ventiladores
K1 = 56.5972;
K2 = 2.9907;
K3 = 860.7608;
%llamamos al sistema de control del proceso
G_PID_DIF_cal = readfis('ucal.fis');
G_PID_DIF_asp = readfis('uasp.fis');

```



```

G_PID_DIF_a = readfis('ua.fis');
%definimos nuestro contenido de humedad final de la madera
CH_ref = 9;
%definimos el resto de las variables para la simulacion
xact = [288.2139;8.9428e-3;80.3121;0;-1.8-0.1237*18.7116;288.2139];
dm_cal = zeros(n,1);
dm_asp = zeros(n,1);
dm_a = zeros(n,1);
error = zeros(n,1);
d_error = zeros(n,1);
int_error = zeros(n,1);
dm_ww = zeros(n,1);
dm_we = zeros(n,1);
m_we = zeros(n,1);
x = zeros(n,6);
Ws = zeros(n,1);
HR = zeros(n,1);
CHE = zeros(n,1);
GS = zeros(n,1);
ant = 0;
for i = 1:n
    %%Hallamos el error entre el Contenido de Humedad Deseado y Actual
    error(i) = CH_ref-xact(3);
    if (i == 1)
        int_error(i) = 0;
        d_error(i) = 0;
    else
        %estimamos la integral del error por el metodo del trapecio
        int_error(i) = (To/2)*(error(i)+error(i-1))+int_error(i-1);
        %estimamos la derivada del error
        d_error(i) = (error(i)-error(i-1))/To;
    end
    %Obtenemos los caudales masicos evaluando estos datos dentro de nuestro
    %sistema de control difuso
    V1 = evalfis([error(i) int_error(i) d_error(i)],G_PID_DIF_cal);
    if V1 > 5
        V1 = 5;
    end
    if V1 < 0
        V1 = 0;
    end
    V2 = evalfis([error(i) int_error(i) d_error(i)],G_PID_DIF_asp);
    if V2 > 5
        V2 = 5;
    end
    if V2 < 0
        V2 = 0;
    end
end

```

```

end
V3 = evalfis([error(i) int_error(i) d_error(i)],G_PID_DIF_a);
if V3 > 5
    V3 = 5;
end
if V3 < 0
    V3 = 0;
end
dm_cal(i) = K1*V1;
dm_esp(i) = K2*V2;
dm_a(i) = K3*V3;
dm_ww(i) = -(P_dw/100)*xact(4);
%Evaluamos los caudales obtenidos en nuestro planta
u = [dm_cal(i);dm_esp(i);dm_a(i);dm_ww(i);dm_we(i);xact];
delta_x = [dx_1(u);dx_2(u);dx_3(u);dx_4(u);dx_5(u);dx_6(u)];
x(i,:) = xact+delta_x*To;
%bloque de programa que se encarga de limitar la salida
%de la variable de estado 1 correspondiente a la temperatura del aire
if x(i,1)<273.15
    x(i,1) = 273.15;
end
%bloque de programa que se encarga de limitar la salida
%de la variable de estado 2 correspondiente a la humedad especifica del
%aire
aux = limit_W(x(i,1:2));
x(i,2) = aux(1);
m_we(i) = aux(2);
dm_we(i) = aux(3);
%bloque de programa que se encarga de limitar la salida
%de la variable de estado 6 correspondiente a la temperatura de la
%madera
if x(i,6)<273.15
    x(i,6) = 273.15;
end
HR(i) = f_7(x(i,1:2));
CHE(i) = f_8([x(i,1) HR(i)]);
GS(i) = x(i,3)/CHE(i);
x(i,3) = x(i,3)+(100/P_dw)*m_we(i);
xact = x(i,:);
end
CH = x(:,3);
dCH = x(:,4);
subplot(311)
plot(t,dm_cal,'r')
grid on
xlabel('Tiempo(h)')
ylabel('Flujo Masico (Kg/h)')

```

```

title('Flujo Masico de la caldera')
subplot(312)
plot(t,dm_esp,'g')
grid on
xlabel('Tiempo(h)')
ylabel('Flujo Masico (Kg/h)')
title('Flujo Masico de los Aspersores')
subplot(313)
plot(t,dm_a,'b')
grid on
xlabel('Tiempo(h)')
ylabel('Flujo Masico (Kg/h)')
title('Flujo Masico de Aire')
figure
plot(t,x(:,1)-273.15,'r')
grid on
hold on
plot(t,x(:,6)-273.15,'g')
xlabel('Tiempo(h)')
ylabel('Temperatura(°C)')
title('Comparacion de Temperaturas')
legend('Del Aire dentro del Secador','De la madera')
figure
subplot(211)
plot(t,HR,'r')
grid on
xlabel('Tiempo(h)')
ylabel('Humedad Relativa(%o)')
subplot(212)
plot(t,x(:,1)-273.15,'g')
grid on
xlabel('Tiempo(h)')
ylabel('Temperatura(°C)')
figure
plot(t,x(:,3),'r')
grid on
hold on
plot(t,CHE,'g')
plot(t,CH_ref*ones(n,1),'b')
xlabel('Tiempo(h)')
ylabel('%o')
title('Desarrollo del Secado')
legend('CH','CHE','CH_d')
figure
subplot(211)
plot(t,dm_ww,'r')
grid on

```

```
xlabel('Tiempo(h)')
ylabel('Flujo Masico(Kg/h)')
title('Flujos Masico de Ganancia de Agua en el aire')
subplot(212)
plot(t,dm_we,'g')
grid on
xlabel('Tiempo(h)')
ylabel('Flujo Masico(Kg/h)')
title('Flujos Masico de Perdida de Agua en el aire')
figure
plot(t,GS,'r')
grid on
xlabel('Tiempo(h)')
ylabel('Gradiente de Secado(decimal)')
title('Calidad del Secado de la Madera Roble')
```

## Propiedades del agua saturada (líquido-vapor): Tabla de presiones

Temp °C	Presión bar	Volumen específico		Energía interna		Entalpía			Entropía	
		m <sup>3</sup> / kg		kJ / kg		kJ / kg			kJ / kg .K	
		Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Vapor	Líquido	Vapor
		sat	sat	sat	sat	sat	vaporiz	sat	sat	sat
		vf x 103	vg	uf	Ug	hf	hfg	hg	sf	sg
0.01000	0.00611	1.00020	206.13600	0.00000	2375.30000	0.01000	2501.30000	2501.40000	0.00000	9.15620
4.00000	0.00813	1.00010	157.23200	16.77000	2380.90000	16.78000	2491.90000	2508.70000	0.06100	9.05140
5.00000	0.00872	1.00010	147.12000	20.97000	2382.30000	20.98000	2489.60000	2510.60000	0.07610	9.02570
6.00000	0.00935	1.00010	137.73400	25.19000	2383.60000	25.20000	2487.20000	2512.40000	0.09120	9.00030
8.00000	0.01072	1.00020	120.91700	33.59000	2386.40000	33.60000	2482.50000	2516.10000	0.12120	8.95010
10.00000	0.01228	1.00040	106.37900	42.00000	2389.20000	42.01000	2477.70000	2519.80000	0.15100	8.90080
11.00000	0.01312	1.00040	99.85700	46.20000	2390.50000	46.20000	2475.40000	2521.60000	0.16580	8.87650
12.00000	0.01402	1.00050	93.78400	50.41000	2391.90000	50.41000	2473.00000	2523.40000	0.18060	8.85240
13.00000	0.01497	1.00070	88.12400	54.60000	2393.30000	54.60000	2470.70000	2525.30000	0.19530	8.82850
14.00000	0.01598	1.00080	82.84800	58.79000	2394.70000	58.80000	2468.30000	2527.10000	0.20990	8.80480
15.00000	0.01705	1.00090	77.92600	62.99000	2396.10000	62.99000	2465.90000	2528.90000	0.22450	8.78140
16.00000	0.01818	1.00110	73.33300	67.18000	2397.40000	67.19000	2463.60000	2530.80000	0.23900	8.75820
17.00000	0.01938	1.00120	69.04400	71.38000	2398.80000	71.38000	2461.20000	2532.60000	0.25350	8.73510
18.00000	0.02064	1.00140	65.03800	75.57000	2400.20000	75.58000	2458.80000	2534.40000	0.26790	8.71230
19.00000	0.02198	1.00160	61.29300	79.76000	2401.60000	79.77000	2456.50000	2536.20000	0.28230	8.68970
20.00000	0.02339	1.00180	57.79100	83.95000	2402.90000	83.96000	2454.10000	2538.10000	0.29660	8.66720
21.00000	0.02487	1.00200	54.51400	88.14000	2404.30000	88.14000	2451.80000	2539.90000	0.31090	8.64500
22.00000	0.02645	1.00220	51.44700	92.32000	2405.70000	92.33000	2449.40000	2541.70000	0.32510	8.62290
23.00000	0.02810	1.00240	48.57400	96.51000	2407.00000	96.52000	2447.00000	2543.50000	0.33930	8.60110
24.00000	0.02985	1.00270	45.88300	100.70000	2408.40000	100.70000	2444.70000	2545.40000	0.35340	8.57940
25.00000	0.03169	1.00290	43.36000	104.88000	2409.80000	104.89000	2442.30000	2547.20000	0.36740	8.55800

26.00000	0.03363	1.00320	40.99400	109.06000	2411.10000	109.07000	2439.90000	2549.00000	0.38140	8.53670
27.00000	0.03567	1.00350	38.77400	113.25000	2412.50000	113.25000	2437.60000	2550.80000	0.39540	8.51560
28.00000	0.03782	1.00370	36.69000	117.42000	2413.90000	117.43000	2435.20000	2552.60000	0.40930	8.49460
29.00000	0.04008	1.00400	34.73300	121.60000	2415.20000	121.61000	2432.80000	2554.50000	0.42310	8.47390
30.00000	0.04246	1.00430	32.89400	125.78000	2416.60000	125.79000	2430.50000	2556.30000	0.43690	8.45330
31.00000	0.04496	1.00460	31.16500	129.96000	2418.00000	129.97000	2428.10000	2558.10000	0.45070	8.43290
32.00000	0.04759	1.00500	29.54000	134.14000	2419.30000	134.15000	2425.70000	2559.90000	0.46440	8.41270
33.00000	0.05034	1.00530	28.01100	138.32000	2420.70000	138.33000	2423.40000	2561.70000	0.47810	8.39270
34.00000	0.05324	1.00560	26.57100	142.50000	2422.00000	142.50000	2421.00000	2563.50000	0.49170	8.37280
35.00000	0.05628	1.00600	25.21600	146.67000	2423.40000	146.68000	2418.60000	2565.30000	0.50530	8.35310
36.00000	0.05947	1.00630	23.94000	150.85000	2424.70000	150.86000	2416.20000	2567.10000	0.51880	8.33360
38.00000	0.06632	1.00710	21.60200	159.20000	2427.40000	159.21000	2411.50000	2570.70000	0.54580	8.29500
40.00000	0.07384	1.00780	19.52300	167.56000	2430.10000	167.57000	2406.70000	2574.30000	0.57250	8.25700
45.00000	0.09593	1.00990	15.25800	188.44000	2436.80000	188.45000	2394.80000	2583.20000	0.63870	8.16480
50.00000	0.12350	1.01210	12.03200	209.32000	2443.50000	209.33000	2382.70000	2592.10000	0.70380	8.07630
55.00000	0.15760	1.01460	9.56800	230.21000	2450.10000	230.23000	2370.70000	2600.90000	0.76790	7.99130
60.00000	0.19940	1.01720	7.67100	251.11000	2456.60000	251.13000	2358.50000	2609.60000	0.83120	7.90960
65.00000	0.25030	1.01990	6.19700	272.02000	2463.10000	272.06000	2346.20000	2618.30000	0.89350	7.83100
70.00000	0.31190	1.02280	5.04200	292.95000	2469.60000	292.98000	2333.80000	2626.80000	0.95490	7.75530
75.00000	0.38580	1.02590	4.13100	313.90000	2475.90000	313.93000	2321.40000	2635.30000	1.01550	7.68240
80.00000	0.47390	1.02910	3.40700	334.86000	2482.20000	334.91000	2308.80000	2643.70000	1.07530	7.61220
85.00000	0.57830	1.03250	2.82800	355.84000	2488.40000	355.90000	2296.00000	2651.90000	1.13430	7.54450
90.00000	0.70140	1.03600	2.36100	376.85000	2494.50000	376.92000	2283.20000	2660.10000	1.19250	7.47910
95.00000	0.84550	1.03970	1.98200	397.88000	2500.60000	397.96000	2270.20000	2668.10000	1.25000	7.41590
100.00000	1.01400	1.04350	1.67300	418.94000	2506.50000	419.04000	2257.00000	2676.10000	1.30690	7.35490
110.00000	1.43300	1.05160	1.21000	461.14000	2518.10000	461.30000	2230.20000	2691.50000	1.41850	7.23870
120.00000	1.98500	1.06030	0.89190	503.50000	2529.30000	503.71000	2202.60000	2706.30000	1.52760	7.12960
130.00000	2.70100	1.06970	0.66850	546.02000	2539.90000	546.31000	2174.20000	2720.50000	1.63440	7.02690

140.00000	3.61300	1.07970	0.50890	588.74000	2550.00000	589.13000	2144.70000	2733.90000	1.73910	6.92990
150.00000	4.75800	1.09050	0.39280	631.68000	2559.50000	632.20000	2114.30000	2746.50000	1.84180	6.83790
160.00000	6.17800	1.10200	0.30710	674.86000	2568.40000	675.55000	2082.60000	2758.10000	1.94270	6.75020
170.00000	7.91700	1.11430	0.24280	718.33000	2576.50000	719.21000	2049.50000	2768.70000	2.04190	6.66630
180.00000	10.02000	1.12740	0.19410	762.09000	2583.70000	763.22000	2015.00000	2778.20000	2.13960	6.58570
190.00000	12.54000	1.14140	0.15650	806.19000	2590.00000	807.62000	1978.80000	2786.40000	2.23590	6.50790
200.00000	15.54000	1.15650	0.12740	850.65000	2595.30000	852.45000	1940.70000	2793.20000	2.33090	6.43230
210.00000	19.06000	1.17260	0.10440	895.53000	2599.50000	897.76000	1900.70000	2798.50000	2.42480	6.35850
220.00000	23.18000	1.19000	0.08619	940.87000	2602.40000	943.62000	1858.50000	2802.10000	2.51780	6.28610
230.00000	27.95000	1.20880	0.07158	986.74000	2603.90000	990.12000	1813.80000	2804.00000	2.60990	6.21460
240.00000	33.44000	1.22910	0.05976	1033.20000	2604.00000	1037.30000	1766.50000	2803.80000	2.70150	6.14370
250.00000	39.73000	1.25120	0.05013	1080.40000	2602.40000	1085.40000	1716.20000	2801.50000	2.79270	6.07300
260.00000	46.88000	1.27550	0.04221	1128.40000	2599.00000	1134.40000	1662.50000	2796.60000	2.88380	6.00190
270.00000	54.99000	1.30230	0.03564	1177.40000	2593.70000	1184.50000	1605.20000	2789.70000	2.97510	5.93010
280.00000	64.12000	1.33210	0.03017	1227.50000	2586.10000	1236.00000	1543.60000	2779.60000	3.06680	5.85710
290.00000	74.36000	1.36560	0.02557	1278.90000	2576.00000	1289.10000	1477.10000	2766.20000	3.15940	5.78210
300.00000	85.81000	1.40360	0.02167	1332.00000	2563.00000	1344.00000	1404.90000	2749.00000	3.25340	5.70450
320.00000	112.70000	1.49880	0.01549	1444.60000	2525.50000	1461.50000	1238.60000	2700.10000	3.44800	5.53620
340.00000	145.90000	1.63790	0.01080	1570.30000	2464.60000	1594.20000	1027.90000	2622.00000	3.65940	5.33570