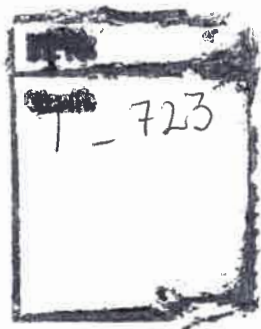


MUNOZ, DIEGO J
Simulacion dinamica

2012 71119

71119



71119



SIMULACIÓN DINÁMICA DEL SECADO CONTINUO DE
SOJA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ALGORITMOS DE
CONTROL AUTOMÁTICO.

Diego J. Muñoz

*Tesis presentada para la obtención del grado de
Magíster en Ciencias de la Ingeniería
Mención: Ingeniería Química*

FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIVERSIDAD NACIONAL DE RÍO CUARTO

Octubre 2012

SIMULACIÓN DINÁMICA DEL SECADO CONTINUO DE SOJA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ALGORITMOS DE CONTROL AUTOMÁTICO

Diego J. Muñoz



Mag. Miriam Martinello
Directora

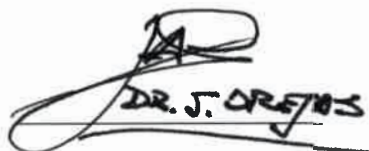


Dr. Sergio A. Giner
Co Director

Aprobada por:



Prof. Jurado



Prof. Jurado



Prof. Jurado

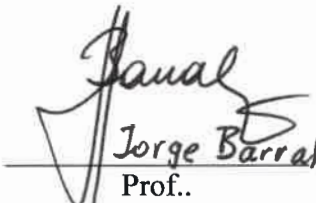


Prof. Jurado



Dr. Leonardo Molinari
Prof..

Secretario de Posgrado de la Facultad de Ingeniería



Secretario de Posgrado y Cooperación Internacional de la UNRC

A mi hijo Pedro y a mi esposa Lucía
A mis padres, Marta y Hugo
A mis hermanos, Verónica, Vanina y Javier
A toda mi familia

AGRADECIMIENTOS

Agradezco eternamente a todos aquellos que hicieron posible la realización de este trabajo.

A mi directora, Mg. Miriam Martinello y a mi Co – Director, Dr. Sergio Giner, por haberme dado la oportunidad de trabajar junto a ellos, por los conocimientos aportados y por la dedicación de gran parte de su tiempo durante todo el desarrollo y escritura de esta tesis.

A la Dra. Cecilia Pagliero, directora del proyecto de investigación del que participo.

A la Mg. María Cristina Gely y al Dr. Sergio Giner por los datos experimentales de secado utilizados en la obtención del modelo matemático.

A la Mg. Miriam Ferrari, por haber colaborado en la elaboración de uno de los capítulos de la tesis.

Al Dr. Sergio Preidikman por haberme ayudado en la resolución matemática del modelo.

Al Dr. Joaquín Orejas por su preocupación en el armado de varios de los cursos realizados.

Al Ing. Ricardo Casas, al Ing. Dídimo Zarate y a la Dra. Susana Schbib por sus aportes en el tema de control.

A la Lic. Verónica Muñoz por su ayuda en la traducción del resumen.

A mis compañeros de oficina, Dr. Diego Acevedo, Ing. Marcelo Flores, Mic. Darío Gómez, Mic. Mariana Juy, Ing. Valentina Sosa y Lic. Alexis Visentín por todos los momentos compartidos en el transcurso del trabajo.

A la Universidad Nacional de Río Cuarto, por haberme brindado la posibilidad de desarrollar tanto mi carrera de grado como de posgrado.

Al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), por el financiamiento para el desarrollo de mi doctorado, siendo la tesis de maestría una etapa intermedia.

TABLA DE CONTENIDOS

Índice General	I
Índice de Tablas	IV
Índice de Figuras	VI
Símbolos	VII
Resumen	X
Summary	XI

Índice General

Capítulo 1: Introducción

3

1.1	Importancia de la soja en Argentina	3
1.2	Pérdidas de cosecha y poscosecha en el cultivo de soja	4
1.3	Necesidad de secado artificial y control	4
1.4	Tipos de secaderos utilizadas para el secado de granos	6
1.5	Modelado matemático de los secaderos de granos	8
1.6	Modelos dinámicos y control de secaderos	10
1.7	Objetivos y propuesta de trabajo	12
1.7.1	Objetivos	12
1.7.2	Metodología y estructura del trabajo	12

Capítulo 2: Desarrollo del modelo matemático

15

2.1	Introducción	17
2.2	Suposiciones	17
2.3	Balances de conservación	18

2.3.1	Balance de masa	18
2.3.1.1	Balance de masa para el agua en el grano	19
2.3.1.2	Balance de masa para el agua en el aire	21
2.3.2	Balance de energía	22
2.3.2.1	Balances de energía en el sólido	23
2.3.2.2	Balance de energía en el aire	26
2.4	Parámetros de las ecuaciones de secado	29
2.4.1	Propiedades del agua y del aire	29
2.4.2	Propiedades del grano y del lecho	30
2.5	Ecuación constitutiva de transferencia de materia	33
2.5.1	Cálculo del parámetro cinético k	37
2.5.2	Forma final de la ecuación cinética	42
2.6	Sistema de ecuaciones del modelo	42
2.7	Caso de estudio	44
<hr/>		
	Capítulo 3: Resolución numérica del modelo matemático	47
<hr/>		
3.1	Introducción	49
3.2	Discretización de las derivadas parciales espaciales	50
3.3	Modelo matemático del secadero expresado en función de las derivadas espaciales discretizadas	52
3.4	Influencia del tamaño de la malla	54
3.5	Conclusión	59
<hr/>		
	Capítulo 4: Resolución numérica del modelo matemático	61
<hr/>		
4.1	Introducción	63
4.2	Análisis de sensibilidad mediante el método derivativo	63
4.2.1	Resultados del análisis de sensibilidad mediante el método derivativo	64

4.3	Análisis de sensibilidad mediante el método de la varianza	66
4.4	Análisis de la influencia de los parámetros	71
4.4.1	Análisis del parámetro a_{vp} y de k	71
4.4.2	Análisis de los parámetros ρ y ε	72
4.4.3	Análisis del parámetro C_{pa}	73
4.4.4	Análisis del parámetro L_g	74
4.5	Conclusiones	74

Capítulo 5: Resultados de estado estacionario		75
---	--	----

5.1	Introducción	77
5.2	Perfiles de humedad y temperatura dentro del secadero en estado estacionario	77
5.3	Variación de la humedad final del grano con las condiciones ambientales: temperatura y humedad relativa del aire ambiente	80
5.4	Variación de la humedad final del grano con las variables operativas del aire	82
5.5	Variación de la humedad final del grano con el flujo del grano	84
5.6	Conclusiones	85

Capítulo 6: Simulación Dinámica		87
---------------------------------	--	----

6.1	Introducción	89
6.2	Respuesta dinámica frente a diferentes perturbaciones sin lazo de control	90
6.2.1	Perturbaciones en la humedad de entrada del grano	91
6.2.2	Perturbaciones en la temperatura de entrada del grano	95
6.2.3	Perturbaciones en la temperatura de aire de secado	97
6.2.4	Perturbaciones en el flujo de granos	99
6.2.5	Perturbaciones en el flujo de aire	100
6.3	Conclusiones	102

Capítulo 7: Aplicaciones en control automático		103
7.1	Introducción	105
7.2	Determinación del flujo de granos requerido para alcanzar la humedad deseada	105
7.3	Sintonización del controlador	107
7.4	Respuesta a lazo cerrado frente a perturbaciones en la humedad de entrada	109
7.5	Conclusiones	112
Capítulo 8: Conclusiones y metas futuras		113
8.1	Conclusiones	115
8.2	Metas futuras y propuestas	116
Anexos		
Anexo I: Código del simulador		119
Anexo II:		131
Bibliografía		135
Índice de Tablas		
Tabla 2.1	Parámetros del ajuste a datos experimentales	38
Tabla 2.2	Parámetros del ajuste de la difusividad	40
Tabla 2.3	Condiciones de borde e iniciales para la puesta en marcha	43
Tabla 2.4	Condiciones de borde e iniciales generales	44
Tabla 2.5	Condiciones de borde e iniciales utilizadas en el análisis	45
Tabla 3.1	Condiciones iniciales y de borde para el sistema discretizado	53
Tabla 3.2	Tiempo de cálculo	55

Tabla 3.3	Humedad promedio del grano a la salida del secadero	55
Tabla 3.4	Temperatura promedio del grano a la salida del secadero	56
Tabla 3.5	Humedad promedio del aire a la salida del secadero	56
Tabla 3.6	Temperatura promedio del aire a la salida del secadero	56
Tabla 3.7	Relación entre el tiempo de cálculo para cada tamaño de malla y para el tamaño de malla menor (5×3)	57
Tabla 3.8	Diferencia relativa entre la humedad final promedio del grano, obtenida para un determinado tamaño de malla y la obtenida para la malla mayor (40×20)	57
Tabla 3.9	Diferencia relativa entre la temperatura final promedio del grano, obtenida para un determinado tamaño de malla y la obtenida para la malla mayor (40×20)	57
Tabla 3.10	Diferencia relativa entre la humedad final promedio del aire, obtenida para un determinado tamaño de malla y la obtenida para la malla mayor (40×20)	58
Tabla 3.11	Diferencia relativa entre la temperatura final promedio del aire, obtenida para un determinado tamaño de malla y la obtenida para la malla mayor (40×20)	58
Tabla 4.1	Parámetros contemplados en el análisis de sensibilidad del modelo mediante el método derivativo.	64
Tabla 4.2	Coefficientes de sensibilidad paramétrica	65
Tabla 4.3	Coefficientes de sensibilidad paramétrica ordenados en forma descendente según valor absoluto	66
Tabla 4.4	ANOVA para la humedad del grano	68
Tabla 4.5	ANOVA para la temperatura del grano	68
Tabla 4.6	ANOVA para la humedad del aire	69
Tabla 4.7	ANOVA para la Temperatura del aire	69
Tabla 6.1	Cambios producidos en la humedad de salida a partir de cambios escalón en la humedad de entrada	93
Tabla 6.2	Humedad promedio de salida del sólido de estado estacionario para distintas escalones en la temperatura del aire de entrada	97
Tabla 6.3	Características de las respuestas dinámicas analizadas	102
Tabla 7.1	Parámetros de sintonía propuestos	109

Índice de Figuras

Figura 1.1	Evolución de la producción de soja en Argentina	3
Figura 1.2	Distribución porcentual de la producción agraria argentina años 2005 a 2010	4
Figura 1.3	Esquema de un secadero industrial	7
Figura 2.1	Volumen de control para las ecuaciones de conservación	18
Figura 2.2	Convergencia de la serie infinita a tiempos largos, solución de Becker a tiempos cortos y serie infinita analítica para esferas.	36
Figura 2.3	Aproximación mediante serie infinita a datos experimentales	38
Figura 2.4	Difusividades aproximadas mediante el modelo de Arrhenius	39
Figura 2.5	Serie infinita analítica para esferas y aproximación mediante una función exponencial	41
Figura 2.6	Datos experimentales extrapolados con la serie completa ajustados con la cinética exponencial	41
Figura 3.1	Esquema del secadero dividido en una malla de $m \times n$ nodos	51
Figura 3.2	Evolución de la humedad a la salida del secadero hasta alcanzar el estado estacionario	54
Figura 4.1	Gráfico de Pareto estandarizado para la humedad del grano	70
Figura 4.2	Gráfico de Pareto estandarizado para la temperatura del grano	70
Figura 4.3	Gráfico de Pareto estandarizado para la humedad del aire	70
Figura 4.4	Gráfico de Pareto estandarizado para la temperatura del aire	71
Figura 5.1	Perfil de humedad del grano en estado estacionario	78
Figura 5.2	Perfil de temperatura del grano en estado estacionario	78
Figura 5.3	Perfil de humedad del aire en estado estacionario	79
Figura 5.4	Perfil de temperatura del aire en estado estacionario	79
Figura 5.5	Humedad final del grano a la salida del secadero en función de la temperatura ambiente, para distintos valores de la humedad relativa ambiente	81
Figura 5.6	Humedad final del grano a la salida del secadero en función de la humedad relativa ambiente para distintos valores de la temperatura ambiente	82
Figura 5.7	Humedad final del grano a la salida del secadero en función del flujo de aire de secado a diferentes temperaturas del aire de secado.	83
Figura 5.8	Humedad final del grano a la salida del secadero en función de la temperatura del aire de secado a diferentes flujos de aire.	84

Figura 5.9	Humedad final del grano a la salida del secadero en función del flujo de granos	85
Figura 6.1	Respuesta dinámica del sistema frente a un cambio escalón de +15% en la humedad de entrada del grano	91
Figura 6.2	Respuesta dinámica del sistema frente a un cambio escalón de -15% en la humedad de entrada del grano	92
Figura 6.3	Respuesta dinámica del sistema frente a una variación oscilatoria (onda cuadrada) en la humedad de entrada del grano	94
Figura 6.4	Respuesta dinámica del sistema frente a una variación aleatoria de humedad de entrada del grano	94
Figura 6.5	Respuesta dinámica del sistema frente a un escalón del 15% en la temperatura de entrada del grano	95
Figura 6.6	Respuesta dinámica del sistema frente a un escalón de -15% en la temperatura de entrada del grano	96
Figura 6.7	Respuesta dinámica del sistema frente a un escalón de +15% en la temperatura de entrada del aire	98
Figura 6.8	Respuesta dinámica del sistema frente a un escalón de -15% en la temperatura de entrada del aire	98
Figura 6.9	Respuesta dinámica del sistema frente a un escalón del 15% en el flujo de granos	99
Figura 6.10	Respuesta dinámica del sistema frente a un escalón de -15% en el flujo de granos	100
Figura 6.11	Respuesta dinámica del sistema frente a un escalón de +15% en el flujo de aire	101
Figura 6.12	Respuesta dinámica del sistema frente a un escalón de -15% en el flujo de aire	101
Figura 7.1	Esquema del secadero con el lazo de control	105
Figura 7.2	Determinación del flujo de granos para lograr la humedad final promedio deseada	107
Figura 7.3	Respuesta dinámica del sistema frente a cambios del 1% en el set point para diferentes valores de ganancia	108
Figura 7.4	Humedad promedio de salida a lazo cerrado bajo diferentes configuraciones de control (Parámetros de Ziegler-Nichols)	110
Figura 7.5	Humedad promedio de salida a lazo cerrado bajo diferentes configuraciones de control (Parámetros de Tyreus – Luyben)	110
Figura 7.6	Humedad promedio de salida a lazo cerrado con control PID configurado con los parámetros propuestos por Tyreus – Luyben frente a un escalón del 10% en la humedad de entrada	111
Figura 7.7	Humedad promedio de salida frente a cambios aleatorios en la humedad de entrada.	112

Símbolos latinos

- A : Factor pre exponencial (ecuación de difusividad) $\left[\frac{m^2}{s} \right]$
- α_{vp} : Área superficial de partícula por unidad de volumen de partícula $\left[\frac{1}{m} \right]$
- C_p : Calor específico $\left[\frac{J}{kg^\circ C} \right]$
- D_g : Diámetro del grano $[m]$
- D : Difusividad efectivo de agua en granos $\left[\frac{m^2}{s} \right]$
- E_A : Energía de activación (ecuación de difusividad) $\left[\frac{J}{mol} \right]$
- G_a : Flujo másico de aire (base seca) $\left[\frac{kg}{m^2 s} \right]$
- G_p : Flujo másico de granos (base seca) $\left[\frac{kg}{m^2 s} \right]$
- h_r : Coeficiente de transferencia de calor $\left[\frac{J}{m^2 s^\circ C} \right]$
- H : Entalpía específica $\left[\frac{J}{kg} \right]$
- h_a : Humedad del aire, $[kg \text{ vapor} / kg \text{ aire seco}]$
- h_r : Humedad relativa del aire de secado
- h_{Ram} : Humedad relativa del aire ambiente
- h_{sat} : Humedad de saturación del aire $[kg \text{ vapor} / kg \text{ aire seco}]$
- k : Coeficiente de la cinética de secado
- k_{Ta} : Conductividad térmica del aire $\left[\frac{J}{ms^\circ C} \right]$
- L_y : Longitud del secadero en la dirección del flujo del grano $[m]$
- L_x : Longitud del secadero en la dirección del flujo de aire $[m]$
- L_g : Calor latente de desorción $\left[\frac{J}{kg} \right]$
- L_w : Calor latente del agua pura $\left[\frac{J}{kg} \right]$
- m : Cantidad de nodos en la dirección y
- n : Cantidad de nodos en la dirección x
- n_r : Número de réplicas en el punto central
- n_w : Velocidad de secado de capa delgada $\left[\frac{kg \text{ agua}}{s \text{ kg sólido secos}} \right]$
- N : Total de simulaciones necesarias
- P_s : Presión de saturación $[Pa]$

R_g : Radio del grano [m]

R : Constante de gas ideal [$J/molK$]

R^2 : Coeficiente de ajuste

t : Tiempo [s]

T : Temperatura del aire [$^{\circ}C$]

W : Humedad del grano [$kg\ agua/kg\ sólido\ seco$]

Símbolos griegos

ε : Fracción de huecos del lecho

λ : Calor de vaporización [J/kg]

μ : Viscosidad del aire [kg/ms]

ρ : Densidad de materia seca en el grano [kg/m^3]

ρ_a : Densidad del aire seco [kg/m^3]

θ : Temperatura del grano [$^{\circ}C$]

Subíndices

a : Aire seco

e : Equilibrio

in : Ingreso

s : Sólido seco

sp : Set point

v : Agua en estado vapor

W : Agua en estado líquido

0 : Inicial

RESUMEN

La soja en Argentina, con 54 millones de toneladas en la campaña 2009/10, representa el 50% de la producción de granos del país. En general los granos son cosechados con un contenido de humedad superior al de almacenamiento seguro, para disminuir las pérdidas a campo. El alto contenido de humedad de los granos cosechados, sin embargo, hace necesario su secado artificial hasta el nivel de humedad seguro para el almacenamiento. El secado, se lleva a cabo en Argentina principalmente en secaderos continuos de flujo cruzado, y debe ser controlado para disminuir las pérdidas de calidad por sobresecado.

El objetivo de este trabajo fue desarrollar e implementar un modelo matemático dinámico en computadora para obtener un simulador del secador de soja que permita estudiar el comportamiento en estado estacionario y la respuesta dinámica del secador tanto a lazo abierto como a lazo cerrado con configuraciones de control convencionales.

El modelo se desarrolló a partir de los balances de conservación de masa y energía. Asimismo, el modelo incorpora una ecuación cinética de secado cuyos coeficientes se determinan a partir de datos experimentales. El modelo se resolvió en forma numérica aplicando el método de las líneas y se implementó en computadora usando el software Matlab, obteniendo el simulador dinámico del secadero.

El simulador se utilizó para (a) analizar la sensibilidad del modelo frente a los parámetros considerados constantes, (b) estudiar el estado estacionario que alcanza el sistema a distintos valores de las variables operativas (humedad y temperatura ambiente, temperatura y flujo de aire de secado, flujo de granos) y (c) evaluar diferentes configuraciones convencionales de control del tipo proporcional, integral y derivativo. Se concluye, como resultado de este trabajo, que se ha logrado obtener un simulador para el proceso de secado de soja en secaderos de flujo cruzado, que representa correctamente la dinámica del sistema. En lo que respecta al control, se comprobó que los algoritmos convencionales no son adecuados para controlar este tipo de proceso por lo que se requiere evaluar esquemas de control avanzado.

SUMMARY

Soybean in Argentina, with 54 million tones in the 2009-2010 cropping season, represents 50% of the total grain production in the country. Crops are generally harvested with moisture content higher than the safe storage moisture content, to reduce field losses. However, the high moisture of the harvested crops requires drying up to a safe moisture content to find safe storage conditions. The drying process, carried out in Argentina mainly in continuous crossflow dryers, must be controlled in order to reduce quality losses, underdrying and overdrying.

The purpose of this study was to develop and apply a computerized dynamic mathematical model in order to build a soybean dryer simulator that enables the study of the dryer performance at steady state and its dynamic response both in open and closed loop with conventional control schemes.

The model was developed using mass and energy balances of mass and energy. The kinetics equation which predicts the drying rate and is part of the dryer model is fitted to experimental data to determine its coefficients. The model was numerically solved applying the method of lines, and was used on the computer using the software Matlab in order to build the dynamic dryer simulator.

The simulator was used to analyze the sensitivity of the model to the parameters considered constant, to study the steady state performance of the system for different values of operating variables (ambient air humidity and temperature, drying air temperature and flow r , grain flow), and to test different conventional control schemes of a proportional, integral and derivative type. From the results of this study it was concluded that the soybean dryer simulator of crossflow dryers correctly represents the dynamics of the system. With regard to process control, the conventional control scheme was shown to be inadequate for this slow process, so that more advanced control algorithms should be assessed in further work.

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 Importancia de la soja en Argentina

Argentina es el tercer productor de soja detrás de Estados Unidos y de Brasil. Además, es el primer exportador mundial de aceite de soja (Johnson y col, 2008).

Desde hace varios años el complejo soja representa uno de los primeros generadores de divisas de Argentina. En el año 2009 ingresaron al país 14.000 millones de dólares de este sector, lo que representa el 22,5% del ingreso total de exportaciones.

La producción de soja en Argentina se ha incrementado en los últimos años, pasando de 27 millones de toneladas en la campaña 2000 /01 a 54 millones en la campaña 2009 /10. En la Figura 1.1 se muestra la evolución en la producción de soja en los últimos 10 años. Se observa una caída en la campaña 2008 /09, esta fue debida a la sequía ocurrida en ese período (MAGyP, 2011).

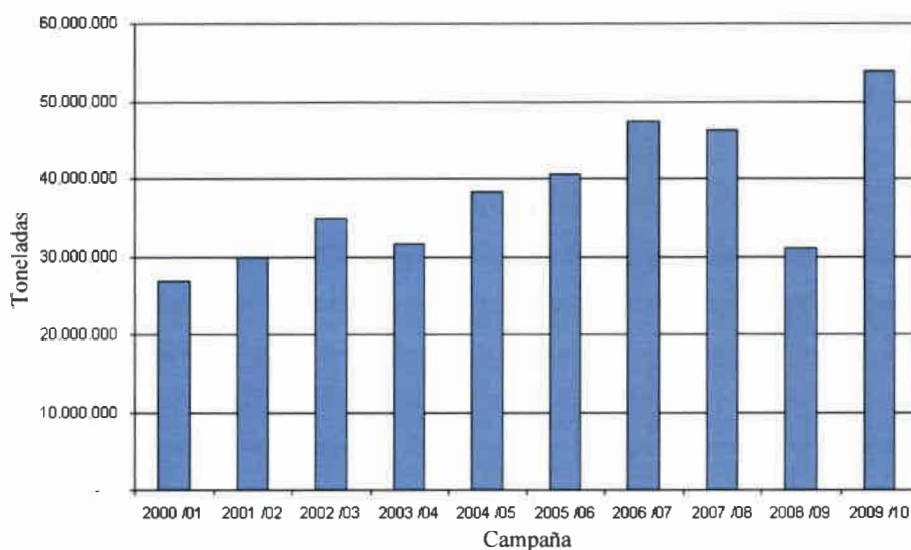


Figura 1.1. Evolución de la producción de soja en Argentina

En la Figura 1.2 se presenta la distribución porcentual de la producción agraria argentina (en toneladas cosechadas) de las últimas 5 campañas. Se observa que la soja representa aproximadamente el 50% del total.

El control del proceso de secado de alimentos es complejo debido a diferentes factores. Desde el punto de vista de los fenómenos de transporte, el secado de alimentos es un proceso que plantea retos técnicos para el modelado: es altamente no lineal y multivariable, lo que dificulta el desarrollo de modelos adecuados para la implementación de sistemas de control (Chen y Mujumdar, 2008).

El control de secaderos es una de las áreas menos estudiadas en el control de procesos y no ha avanzado de igual modo que el diseño de los equipos de secado, esto puede deberse a diferentes factores:

- La falta de énfasis en la calidad del producto.
- Una aparente falta de conocimiento de la importancia del control del secadero en la calidad del producto y en la eficiencia del proceso.
- La complejidad y la alta no linealidad de la dinámica del proceso de secado, que conduce a dificultades en el modelado del proceso (Jumah y col., 1995).

1.4 Tipos de secaderos utilizadas para el secado de granos

Los procesos usados para secar los granos pueden dividirse en dos grandes categorías: de baja temperatura (con aire a temperatura ambiente o temperatura ambiente + 6°C) y de alta temperatura (aire a temperatura mayor de 50°C).

Por otra parte, el secado puede ser realizado en silos (“in bin”) comúnmente usados para el almacenamiento o en secaderos continuos de mayor capacidad.

En el secado en silos el sólido está estacionario, conformando un lecho profundo ó lecho fijo de partículas, y el aire circula a través del mismo.

Existen diferentes tipos de secaderos continuos. Los más empleados en la industria, que difieren básicamente en la forma de circulación relativa del sólido y del aire, son:

- Secadores de flujo cruzado
- Secadores de flujo contracorriente
- Secadores de flujo co-corriente
- Secaderos de flujo mixto

En los secaderos de flujo cruzado el flujo de aire es perpendicular al flujo de granos. En los secaderos de flujo en contracorriente los granos y el aire circulan en direcciones opuestas, mientras que en los de flujo cocorriente lo hacen en la misma dirección. En los secaderos de flujo mixto se combinan estos distintos tipos de circulación de sólidos

y aire. Todos estos secaderos, que son de tipo convectivo, usan un ventilador o dispositivo similar para mover el aire a través de la cámara de secado que contiene al grano. También están provistos de dispositivos (intercambiador de calor, quemadores, etc.) para calentar el aire.

Existen también otros secaderos continuos, no tan usados para granos y con características y aplicaciones especiales, tales como los secaderos rotatorios, los secaderos de lecho fluidizado y los secaderos de lecho fijo de chorro (Brooker y col., 1992; de Dios, 1996).

En nuestro país uno de los secaderos más utilizados es de flujo cruzado (Bragachini y Casini, 2005). En la Figura 1.3 se muestra un esquema de un secadero de flujo cruzado. El grano fluye por gravedad desde la parte superior, pasando por la zona de secado, que consiste en una o varias columnas. Perpendicular al flujo de grano, fluye el aire caliente. En la sección de enfriamiento el flujo de aire también es perpendicular al flujo de granos, sólo que en este caso se utiliza aire a temperatura ambiente. El espesor de las columnas está entre 0,25 y 0,45 m. La longitud de las columnas está entre 3 y 30 m en la sección de secado y entre 1 a 10 metros en la sección de enfriamiento. El rango del flujo de aire en ambas secciones es de 0,25 a 0,5 $m^3/s m^2$ (Brooker y col., 1992).

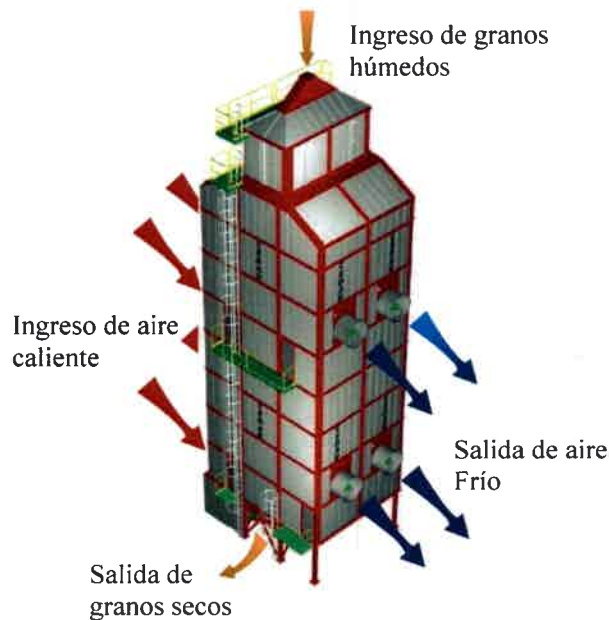


Figura 1.3. Esquema de un secadero de flujo cruzado

1.5 Modelado matemático de los secaderos de granos

Los modelos de procesos en general, y de los secaderos en particular, pueden clasificarse de distintas formas. Una de ellas distingue entre *modelos de parámetros concentrados ó agrupados* y *modelos de parámetros distribuidos*. Los modelos de parámetros concentrados relacionan la humedad de salida del secadero con la humedad de entrada y el tiempo de secado. Los demás factores (temperatura y flujo del aire, dimensiones del secadero) se agrupan en uno o dos coeficientes que deben ser determinados (por simulación en computadora, experimentalmente, etc.). Estos modelos son simples pero tienen varias limitaciones, entre las que pueden mencionarse la necesidad de determinar los parámetros, la falta de predicción de la distribución espacial de humedad en el secadero y la falta de representación de las características reales del proceso debido a su simplificación. Los modelos de parámetros distribuidos son más completos que los de parámetros concentrados y proveen información detallada del proceso, tal como el perfil de humedad del grano en el secadero. Por lo cual, los modelos de parámetros distribuidos son superiores como modelos de proceso para implementar el control de un secadero. Si bien requieren mayor tiempo de cómputo, teniendo en cuenta que actualmente los costos computacionales se han reducido considerablemente, esto ya no constituye una desventaja importante (Lufty y col., 2008).

Los modelos de parámetros agrupados más comunes para secaderos son lineales o exponenciales. El modelo de parámetros distribuidos más completo es el constituido por el sistema de ecuaciones diferenciales a derivadas parciales que representan los balances de masa y energía para el aire y para los granos, aunque hay modelos más sencillos obtenidos simplificando esas ecuaciones a través de distintas consideraciones que pueden aplicarse a situaciones particulares.

Otra clasificación de los modelos se relaciona con el tipo de datos que manejan: en los *modelos determinísticos* se requiere disponer de datos ciertos mientras que los *modelos estocásticos o probabilísticos* admiten datos que no se conocen con certeza ó bien se determinan a través de distribuciones de probabilidad, dando cabida a la naturaleza probabilística de los fenómenos naturales.

Muchos de los modelos desarrollados para los secaderos de granos han dado lugar, para el caso de secaderos continuos, a simuladores de estado estacionario que son

sumamente útiles para el diseño de los equipos y el conocimiento de sus prestaciones en distintas condiciones operativas, aunque no permiten conocer la respuesta dinámica del sistema ante cambios en las condiciones operativas.

El modelado de secaderos de granos de lecho fijo ha recibido una atención considerable por parte de la comunidad científica, tanto para el secado con aire a baja temperatura como para el secado con aire a alta temperatura. En los trabajos recientes se plantean modelos basados en las ecuaciones diferenciales de balance de masa y energía, con y sin los términos de acumulación en el aire, resueltos con distintos métodos numéricos y aplicados a distintos granos (Srivastava y John, 2002; Hossain y col., 2003; Aregba y Nadeau, 2007; Naghavi y col., 2010; Zare y Chen, 2009).

Brooker y col., 1992 presentan el sistema de ecuaciones diferenciales a derivadas parciales, con sus respectivas condiciones de borde, para modelar y simular secaderos de lecho fijo, flujo cruzado, cocorriente y contracorriente, analizando su aplicación para el secado de maíz, arroz y trigo.

El secado de trigo, tanto en secaderos de lecho fijo como en secaderos de flujo mixto, ha sido modelado a través de un sistema de ecuaciones diferenciales a derivadas parciales. Este modelo fue validado con datos experimentales y aplicado para el estudio del efecto de condiciones operativas y de distintos modos de funcionamiento (Giner y col., 1996; Giner y col., 1998; Giner y Bruce, 1998; Giner, 1999).

Farkas y col. (2000) encontraron que el modelo de redes neuronales puede ser usado para estimar la distribución de humedad en un secadero de lecho fijo. Liu y col. (2007) usaron algoritmos genéticos para optimizar la topología de las redes neuronales que se emplearon para la predicción de la humedad de salida de un secadero de flujo mixto.

Liu y Bakker-Arkema (1997) desarrollaron un modelo estocástico para secaderos de maíz de contracorriente, cocorriente y flujo cruzado, que permite tener en cuenta la variabilidad de la humedad de entrada de los granos, que tiene una distribución normal (Liu y col., 1997). El modelo obtenido se usó para investigar la influencia las variables operativas (temperatura del aire de entrada, flujo de aire, flujo del grano) en la distribución de la humedad de salida de un secadero de flujo cruzado (Bakker-Arkema y Liu, 1997).

Para el caso específico de secaderos continuos de soja, Barrozo y col. (1999) desarrollaron un modelo matemático de estado estacionario para secaderos de flujo cruzado a partir de los balances de masa y energía, validado con datos experimentales;

Lacerda y col. (2005) modelaron un secadero a contra corriente en estado estacionario, estudiando los fenómenos de transferencia de calor y masa entre el aire y los granos, mientras que Lira y col. (2009) utilizaron un modelo de estado estacionario basado en las ecuaciones diferenciales a derivadas parciales con cinética difusiva para un secadero a contra corriente para analizar la sensibilidad del modelo frente a parámetros físico químicos y la influencia de los perfiles de velocidad de aire.

1.6 Modelos dinámicos y control de secaderos

Los modelos de estado estacionario no pueden ser aplicados para simular la dinámica del proceso de secado, ya que no permiten determinar la transición de un estado a otro. Esto impide la utilización de dichos modelos en sistemas de control, es decir que para la implementación de un sistema de control se requiere disponer de un modelo dinámico del secadero. Se han desarrollado, para diferentes aplicaciones, modelos dinámicos para secaderos de distinto grado de complejidad, normalmente asociados a aplicaciones en control.

Marchant (1984) utilizó un modelo exponencial simple de un secadero continuo de granos para analizar su comportamiento dinámico frente a diferentes perturbaciones en la humedad de entrada, tanto a lazo abierto como a lazo cerrado (control proporcional y proporcional-integral), utilizando como variable manipulada la velocidad de descarga del grano.

Nybrant (1989) utilizó un modelo lineal discreto en el tiempo para diseñar un control adaptivo para un secadero (de laboratorio) de trigo de flujo contracorriente, considerando como variables controladas la temperatura final ó máxima del grano, que no resultó adecuado para el control de humedad final del grano.

El modelado dinámico de secaderos de flujo cruzado de arroz fue presentado por Platt y col. (1991) que desarrollaron el modelo sobre la base de las ecuaciones diferenciales a derivadas parciales que representan a los balances de masa y energía. Aunque para el desarrollo de una estrategia de control feedforward-feedback usan un modelo simple basado en el balance de masa (Platt y col., 1992).

Courtois y col. (1993) desarrollaron un modelo matemático para secaderos de maíz de flujo mixto, considerando al grano de maíz compuesto por tres compartimientos concéntricos que están a la misma temperatura pero a distinta humedad. Así, el modelo cuenta con seis ecuaciones diferenciales a derivadas parciales, cuatro corresponden al

grano (la humedad de cada compartimiento y la temperatura) y dos al aire (humedad y temperatura).

Liu y col. (2001) usaron un modelo de parámetros distribuidos para un secadero de maíz de flujo cruzado para diseñar un control predictivo basado en el modelo.

Liu y Bakker-Arkema (2001a) simplificaron los balances de masa y energía de un secadero de flujo cruzado, de modo de obtener una expresión algebraica para la velocidad de descarga en función de la humedad (modelo inverso). Este modelo fue utilizado para el desarrollo de un controlador predictivo (Liu y Bakker-Arkema, 2001b) que fue probado con buenos resultados en un secadero de maíz (Liu y Bakker-Arkema, 2001c).

El secado de arroz en secaderos de flujo cruzado fue modelado por Rumsey y Rovedo (2001), que desarrollaron un modelo matemático dinámico bidimensional basado en las ecuaciones diferenciales a derivadas parciales de los balances de masa y energía. En este trabajo se utiliza el modelo para analizar la dinámica del proceso a lazo abierto (modificando la temperatura del aire de secado o el flujo de granos) pero no se aplica ninguna configuración de control. Se encontró que el modelo predice correctamente los datos experimentales.

Un modelo estadístico para el secado fue desarrollado por Liu y col. (2006) que usaron el análisis de componente principal para analizar la covarianza de un conjunto de datos experimentales. Este modelo fue utilizado para la implementación de un sistema de control que fue probado en un secadero comercial de flujo mixto.

Hu y col. (2010) consideran tres modelos para secaderos de flujo cruzado, dos modelos basados en ecuaciones diferenciales a derivadas parciales, uno de ellos en estado estacionario y el otro dinámico, y un modelo de parámetros distribuidos obtenido mediante la simplificación del modelo de ecuaciones diferenciales a derivadas parciales. Este último modelo fue utilizado para desarrollar un controlador predictivo que se aplicó exitosamente en un secadero de flujo cruzado.

En particular, no se conocen investigaciones académicas sobre el modelado dinámico del secado de soja en secaderos de flujo cruzado en Argentina. Se considera que este tema es de gran importancia para un país que produce anualmente 50 millones de toneladas de granos de soja.

1.7 Objetivos y propuesta de trabajo

1.7.1 Objetivos

El objetivo general de este trabajo es obtener un modelo matemático dinámico para el secado de soja en secaderos continuos de flujo cruzado e implementar algoritmos convencionales de control automático.

Este objetivo general comprende los siguientes objetivos específicos:

- Profundizar el conocimiento de los principios del proceso de secado.
- Desarrollar el modelo matemático detallado del secadero a partir de las ecuaciones diferenciales (balances de masa y energía) que describen el proceso.
- Resolver el modelo desarrollado en computadora usando un método numérico adecuado para obtener un simulador del proceso.
- Estudiar la respuesta dinámica a lazo abierto usando el simulador obtenido
- Evaluar diferentes algoritmos convencionales de control automático mediante el análisis de respuesta dinámica del sistema a lazo cerrado.

1.7.2 Metodología y estructura del trabajo

El trabajo se compone de ocho capítulos, en el presente capítulo se realizó una introducción del tema y se presentaron los objetivos del trabajo.

Posteriormente, en el capítulo 2 se desarrolla el modelo matemático dinámico del secado de soja en un secadero de flujo cruzado, partiendo de los balances de masa y energía para los granos y el aire. Se obtiene además, la ecuación de la cinética de secado necesaria en el modelo matemático. En el capítulo 3 se presenta la metodología utilizada para resolver el modelo matemático obtenido. A partir de la solución propuesta, se desarrolla un simulador mediante código computacional. En el capítulo 4 se realiza un análisis de sensibilidad paramétrica del modelo.

En el capítulo 5 se utiliza el simulador para describir los perfiles de humedad y temperatura en estado estacionario para un determinado secadero. Se realizan simulaciones frente a distintas condiciones de secado.

En el capítulo 6 se realizan simulaciones dinámicas para analizar la influencia de las perturbaciones de las variables operativas sobre la humedad de salida del grano en estado transitorio.

En el capítulo 7 se utiliza el simulador desarrollado para evaluar diferentes configuraciones de control convencionales (del tipo PID). Los parámetros del algoritmo de control (parámetros de sintonía) se obtienen mediante el método de Ziegler – Nichols (1942). Se analiza la respuesta del sistema a lazo cerrado utilizando la mejor configuración encontrada frente a perturbaciones en la humedad de entrada.

El capítulo 8, se presentan las conclusiones del presente trabajo de investigación y propuestas para trabajos futuros.

Se incluyen además dos anexos, uno con el código del programa y otro con los datos utilizados en el análisis de sensibilidad.



CAPÍTULO 2: DESARROLLO DEL MODELO MATEMÁTICO

2.1 Introducción

En el presente capítulo se desarrolla el modelo matemático dinámico del secado de granos de soja en un secadero de flujo cruzado. Este modelo se obtiene a partir de los balances de conservación de masa y energía, para las dos fases: sólida (granos) y gaseosa (aire intergranular). Se determina la ecuación cinética que interviene en estos balances a partir de los datos experimentales presentados por Gely y Giner (2007).

2.2 Suposiciones

En el desarrollo del modelo se realizan las siguientes suposiciones:

- (I) El flujo de aire es unidireccional y uniformemente repartido en la sección transversal del lecho.
- (II) La conducción de calor entre los granos del lecho se considera despreciable, fundamentalmente por la reducida área de contacto, comparada con la transferencia convectiva aire-granos.
- (III) En el interior de los granos no hay resistencia a la transferencia de calor, consecuentemente el perfil de temperatura es plano.
- (IV) Los granos se asumen como esferas de igual volumen que el grano para el cálculo del radio de la partícula. La relación área externa/volumen de la partícula se calcula considerando forma esférica usando ese radio y se considera igual para la transferencia de materia y de energía.
- (V) Las pérdidas de calor a través las paredes del lecho se consideran despreciables comparadas con la magnitud de la transferencia aire – granos (secadero adiabático)
- (VI) No se considera el encogimiento del lecho, de modo que el volumen del lecho y su porosidad son constantes e iguales a los valores iniciales.
- (VII) Los calores específicos del aire y de los granos se consideran constantes con la temperatura, aunque sí se tiene cuenta su variación con el contenido de humedad

2.3 Balances de conservación

El desarrollo de las ecuaciones del modelo se basa en los balances básicos de masa y energía, planteados para un volumen de control (Bird, 2008). El volumen de control (Figura 2.1) consiste en este caso en un paralelepípedo rectangular de dimensiones $L_z \Delta x \Delta y$ que representa un sector genérico del secadero, en el cual entran y salen el sólido y el aire, en forma perpendicular entre sí (flujo cruzado).

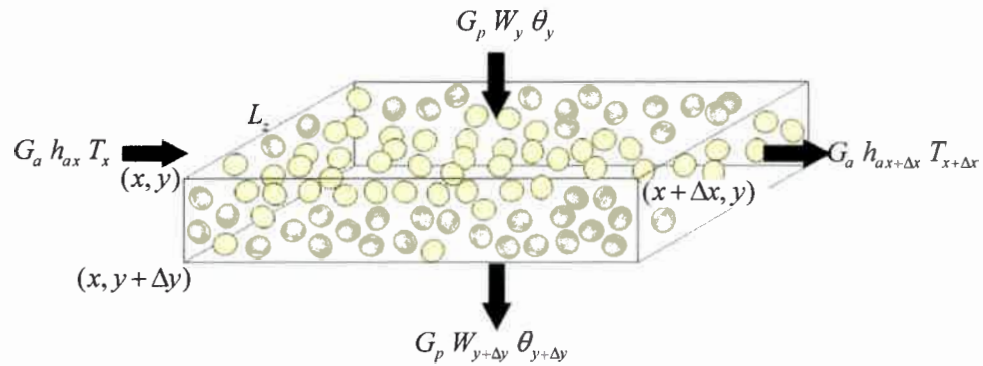


Figura 2.1. Volumen de control para las ecuaciones de conservación.

2.3.1 Balance de masa

En función del principio de conservación de la materia, el balance de masa total queda:

$$\left| \begin{array}{l} \text{Velocidad de} \\ \text{acumulación de} \\ \text{materia} \end{array} \right| = \left| \begin{array}{l} \text{Velocidad de} \\ \text{entrada de} \\ \text{materia} \end{array} \right| - \left| \begin{array}{l} \text{Velocidad de} \\ \text{salida de} \\ \text{materia} \end{array} \right|$$

Al plantear el balance de masa para un componente del sistema, como por ejemplo el agua, aparece un término adicional que contempla la aparición o desaparición de masa de ese componente del sistema en cuestión. En este caso, en ese término se tiene en cuenta la evaporación de agua debido al secado, que pasa del sólido al aire.

$$\left| \begin{array}{c} \text{Velocidad} \\ \text{de} \\ \text{acumulación} \\ \text{de materia} \end{array} \right| = \left| \begin{array}{c} \text{Velocidad} \\ \text{de entrada} \\ \text{de materia} \end{array} \right| - \left| \begin{array}{c} \text{Velocidad} \\ \text{de salida} \\ \text{de materia} \end{array} \right| + \left| \begin{array}{c} \text{Velocidad de} \\ \text{transferencia} \\ \text{de masa del} \\ \text{componente} \end{array} \right|$$

2.3.1.1 Balances de masa para el agua en el grano

$$\left| \begin{array}{c} \text{Velocidad de} \\ \text{acumulación de} \\ \text{agua en el grano} \end{array} \right| = \left| \begin{array}{c} \text{Velocidad de} \\ \text{entrada de agua} \\ \text{debida al flujo} \\ \text{de granos} \end{array} \right| - \left| \begin{array}{c} \text{Velocidad de} \\ \text{salida de agua} \\ \text{debida al flujo} \\ \text{de granos} \end{array} \right| - \left| \begin{array}{c} \text{Velocidad de} \\ \text{transferencia de} \\ \text{vapor hacia el aire} \end{array} \right|$$

El término de velocidad de acumulación de agua del grano en el volumen de control es:

$$\rho(1-\varepsilon)S\Delta y \frac{\partial W}{\partial t} \tag{2.1}$$

Donde ρ es la densidad del sólido seco, ε es la porosidad del lecho, S es el área atravesada por el flujo de granos ($L_z\Delta x$) y Δy es la longitud del volumen de control.

La velocidad de entrada de agua al volumen de control debida al flujo de granos es:

$$G_p SW_y \tag{2.2}$$

Mientras que la velocidad de salida de agua del volumen de control debida al flujo de granos es:

$$G_p SW_{y+\Delta y} \tag{2.3}$$

G_p es el flujo másico de granos secos y W es la humedad del grano, en base seca. Los subíndices y e $y+\Delta y$ indican entrada y salida del volumen de control, respectivamente.

La velocidad de transferencia de vapor de agua desde el grano hacia el aire es:

$$\Delta y S (1 - \varepsilon) \rho n_w \quad (2.4)$$

Donde n_w corresponde a la velocidad de secado.

Combinando las ecuaciones (2.1) a (2.4) se tiene el balance de masa para el agua en el grano en un volumen de control:

$$\rho (1 - \varepsilon) S \Delta y \frac{\partial W}{\partial t} = G_p S W_y - G_p S W_{y+\Delta y} - \Delta y S (1 - \varepsilon) \rho n_w \quad (2.5)$$

Dividiendo por el volumen de control, tomando límite para $\Delta y \rightarrow 0$ y reordenando la expresión, se obtiene la ecuación de variación de humedad del grano.

$$\boxed{\frac{\partial W}{\partial t} = -\frac{G_p}{\rho(1-\varepsilon)} \frac{\partial W}{\partial y} - n_w} \quad (2.6)$$

La ecuación (2.6) describe la variación puntual de la humedad del grano en el tiempo. El primer término del lado derecho de la ecuación, representa la variación de la humedad debida al transporte de granos en la dirección de su flujo. El segundo término representa el cambio debido a la transferencia de agua entre los granos y el aire. Si bien ambos términos están precedidos por un signo negativo, de acuerdo a las condiciones de secado, dichos términos pueden ser positivos o negativos. El valor de $\frac{\partial W}{\partial y}$ será negativo cuando la humedad de entrada sea mayor que la de salida haciendo que el primer término sea positivo. Esta es la situación mas común ya que el objetivo del secado es reducir el contenido de humedad del sólido, por lo cual la humedad de salida será menor que la de entrada en la dirección del flujo de sólidos. El segundo término será negativo si la humedad de los granos es superior a la humedad de equilibrio correspondiente a las condiciones de secado prevalecientes y consecuentemente los granos se secan, ya que en ese caso n_w es positivo.

2.3.1.2 Balances de masa para el agua en el aire

Velocidad de acumulación de agua en el aire	=	Velocidad de entrada de agua debida al flujo de aire	-	Velocidad de salida de agua debida al flujo de aire	+	Velocidad de transferencia de vapor desde el grano
---	---	--	---	---	---	--

La velocidad de acumulación de agua en el aire es:

$$\rho_a \varepsilon S_1 \Delta x \frac{\partial h_a}{\partial t} \tag{2.7}$$

Donde ρ_a es la densidad del aire, S_1 es el área del volumen de control atravesada por el flujo de aire ($L_z \Delta y$) y Δx es la longitud recorrida por el flujo del mismo.

La velocidad de entrada de agua al volumen de control debida al flujo de aire es:

$$G_a S_1 h_{ax} \tag{2.8}$$

La velocidad de salida de agua al volumen de control debida al flujo de aire es:

$$G_a S_1 h_{ax+\Delta x} \tag{2.9}$$

G_a es el flujo másico de aire seco y h es la humedad del aire, en base seca. Los subíndice x y $x + \Delta x$ indican entrada y salida del volumen de control, respectivamente.

La velocidad de transferencia de vapor desde el grano es:

$$\Delta x S_1 (1 - \varepsilon) \rho n_w \tag{2.10}$$

Combinando las ecuaciones (2.7) a (2.10), el balance de masa para el agua en el aire en un volumen de control $\Delta x S_1$ queda:

$$\rho_a \varepsilon S_1 \Delta x \frac{\partial h_a}{\partial t} = G_a S_1 h_{ax} - G_a S_1 h_{ax+\Delta x} + \Delta x S_1 (1 - \varepsilon) \rho n_w \tag{2.11}$$

Dividiendo por el volumen de control, tomando límite para $\Delta x \rightarrow 0$ y reordenando la expresión, se obtiene:

$$\boxed{\frac{\partial h_a}{\partial t} = -\frac{G_a}{\rho_a \varepsilon} \frac{\partial h_a}{\partial x} + \frac{(1-\varepsilon) \rho n_w}{\rho_a \varepsilon}} \quad (2.12)$$

La ecuación (2.12) define la variación puntual de la humedad del aire en el tiempo. El primer término del lado izquierdo está relacionado con la variación de la humedad debida al flujo de aire, mientras que el segundo con la variación debida a la transferencia de agua entre el grano y el aire. Al igual que en el caso de la ecuación de variación de humedad del grano, ambos términos pueden ser positivos o negativos independientemente de los signos que preceden a cada uno de ellos. El término $\frac{\partial h_a}{\partial x}$ será positivo si la humedad de entrada es menor que la humedad de salida, situación acorde a la esencia de la operación: el aire recibe, en su trayecto entre la entrada y la salida del secadero, la humedad del grano que se seca. El término n_w será positivo si el grano se seca y negativo si se humidifica (lo cual depende de la relación entre la humedad de los granos y la humedad de equilibrio) y por lo tanto hará que el aire aumente su humedad o la disminuya, respectivamente.

2.3.2 Balances de energía

El balance de energía se basa en el primer principio de la termodinámica, que expresado para un sistema abierto, establece:

$$\left| \begin{array}{l} \text{Velocidad de} \\ \text{acumulación de} \\ \text{energía dentro} \\ \text{de los granos} \end{array} \right| = \left| \begin{array}{l} \text{Velocidad de} \\ \text{entrada de} \\ \text{energía por} \\ \text{convección} \end{array} \right| - \left| \begin{array}{l} \text{Velocidad de} \\ \text{salida de energía} \\ \text{por convección} \end{array} \right| + \left| \begin{array}{l} \text{Velocidad neta} \\ \text{de transferencia} \\ \text{de calor por} \\ \text{conducción} \end{array} \right| + \left| \begin{array}{l} \text{Velocidad neta de} \\ \text{trabajo realizado} \\ \text{sobre el sistema} \\ \text{por fuerzas} \\ \text{externas} \end{array} \right|$$

Se consideran despreciables los cambios de energía cinética frente a los cambios de energía interna. Además no se incluye el término de trabajo ya que se considera que no hay trabajo contra partes móviles y que la fuerza de gravedad es baja en comparación con otros aportes del balance de energía. Debido a que la transferencia de calor por conducción intergranular es mucho menor que la transferencia de calor por convección, la primera es despreciada. Esta consideración está avalada por las conclusiones obtenidas en un trabajo reciente (Giner y col., 2010) en el que se demuestra mediante la definición de un número de Biot de transferencia de calor modificado para el secado, que este es bajo y tiende a cero conforme avanza el proceso de secado.

Por otro lado, el cambio de energía interna (U) se reemplaza por el de entalpía (H) ya que se desprecia el cambio de volumen específico frente al cambio de H .

2.3.2.1 Balance de energía en el sólido

Velocidad de acumulación de energía térmica dentro de los granos	=	Velocidad neta de entrada de energía térmica asociada al flujo de granos	+	Velocidad de transferencia de calor convectiva desde el aire	-	Velocidad de variación de la energía térmica debida al agua evaporada
--	---	--	---	--	---	---

El término de acumulación de energía dentro de los granos es:

$$\rho(1-\varepsilon)S\Delta y\left(\frac{\partial H}{\partial t}\right) \quad (2.13)$$

La velocidad neta de entrada de energía térmica asociada al flujo de granos queda:

$$G_p SH_y - G_p SH_{y+\Delta y} \quad (2.14)$$

Como se mencionó en el balance de masa para el agua en el grano, G_p es el flujo de materia seca, mientras que H_y representa la entalpía de los granos de entrada mientras que $H_{y+\Delta y}$ la entalpía de los granos de salida del volumen de control.

La velocidad de transferencia de calor convectiva desde el aire es:

$$\dot{Q} = h_r a_{vp} (1 - \varepsilon) S \Delta y (T - \theta) \quad (2.15)$$

h_r es el coeficiente de transferencia de calor convectivo, a_{vp} es el área superficial del grano por unidad de volumen, T es la temperatura del aire y θ es la temperatura del grano.

La velocidad de variación de la energía térmica debida al agua evaporada es:

$$\dot{m}_v H_v \quad (2.16)$$

\dot{m}_v es la velocidad de transferencia de agua hacia el aire y está dada por la expresión (2.4). H_v es la entalpía del agua evaporada a la temperatura del grano.

Combinando las ecuaciones (2.13) a (2.16) con la (2.4) se tiene que el balance de energía para el sólido en el volumen de control es:

$$\rho(1 - \varepsilon) S \Delta y \left(\frac{\partial H}{\partial t} \right) = G_p S H_y - G_p S H_{y+\Delta y} + h_r a_{vp} (1 - \varepsilon) S \Delta y (T - \theta) - \Delta y S (1 - \varepsilon) \rho n_w H_v \quad (2.17)$$

Dividiendo por $\Delta y S$ y tomando límite para $\Delta y \rightarrow 0$, se tiene:

$$\rho(1 - \varepsilon) \left(\frac{\partial H}{\partial t} \right) = -G_p \left(\frac{\partial H}{\partial y} \right) + h_r a_{vp} (1 - \varepsilon) (T - \theta) - (1 - \varepsilon) \rho n_w H_v \quad (2.18)$$

La entalpía de los granos húmedos se calcula combinando las entalpías de materia seca y agua líquida de la siguiente manera:

$$H = H_s + H_w W \quad (2.19)$$

Donde H_w es la entalpía del agua adsorbida a la temperatura del grano y H_s es la entalpía de la materia seca del grano.

Derivando la expresión (2.19) respecto de t por un lado y respecto de y por otro, se tiene:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial H_s}{\partial t} + \frac{\partial H_w}{\partial t} W + \frac{\partial W}{\partial t} H_w \quad (2.20)$$

$$\frac{\partial H}{\partial y} = \frac{\partial H_s}{\partial y} + \frac{\partial H_w}{\partial y} W + \frac{\partial W}{\partial y} H_w \quad (2.21)$$

Con estas expresiones, la ecuación (2.18) queda:

$$\rho(1-\varepsilon) \left(\frac{\partial H_s}{\partial t} + \frac{\partial H_w}{\partial t} W + \frac{\partial W}{\partial t} H_w \right) = -G_p \left(\frac{\partial H_s}{\partial y} + \frac{\partial H_w}{\partial y} W + \frac{\partial W}{\partial y} H_w \right) + h_t a_{vp} (1-\varepsilon)(T-\theta) - (1-\varepsilon) \rho n_w H_v$$

Que se puede reordenar a:

$$\rho(1-\varepsilon) \left(\frac{\partial H_s}{\partial t} + \frac{\partial H_w}{\partial t} W \right) + \rho(1-\varepsilon) \frac{\partial W}{\partial t} H_w + G_p \left(\frac{\partial W}{\partial y} H_w \right) = -G_p \left(\frac{\partial H_s}{\partial y} + \frac{\partial H_w}{\partial y} W \right) + h_t a_{vp} (1-\varepsilon)(T-\theta) - (1-\varepsilon) \rho n_w H_v$$

Reemplazando $\frac{\partial W}{\partial t}$ a partir de lo obtenido en la ecuación (2.6)

$$\rho(1-\varepsilon) \left(\frac{\partial H_s}{\partial t} + \frac{\partial H_w}{\partial t} W \right) = -G_p \left(\frac{\partial H_s}{\partial y} + \frac{\partial H_w}{\partial y} W \right) + h_t a_{vp} (1-\varepsilon)(T-\theta) - (1-\varepsilon) \rho n_w H_v + n_w \rho(1-\varepsilon) H_w$$

Haciendo factor común $-(1-\varepsilon) \rho n_w$ en el lado derecho de la expresión anterior,

$$\rho(1-\varepsilon) \left(\frac{\partial H_s}{\partial t} + \frac{\partial H_w}{\partial t} W \right) = -G_p \left(\frac{\partial H_s}{\partial y} + \frac{\partial H_w}{\partial y} W \right) + h_t a_{vp} (1-\varepsilon)(T-\theta) - (1-\varepsilon) \rho n_w (H_v - H_w)$$

La diferencia $H_v - H_w$ es el calor latente de desorción L_g evaluado a W y T .

$$\rho(1-\varepsilon) \left(\frac{\partial H_s}{\partial t} + \frac{\partial H_w}{\partial t} W \right) = -G_p \left(\frac{\partial H_s}{\partial y} + \frac{\partial H_w}{\partial y} W \right) + h_t a_{vp} (1-\varepsilon)(T-\theta) - (1-\varepsilon) \rho n_w L_g$$

Teniendo en cuenta que $H_s = C_{ps} \theta$ y que $H_w = C_{pw} \theta$

$$\rho(1-\varepsilon) (C_{ps} + C_{pw} W) \frac{\partial \theta}{\partial t} = -G_p (C_{ps} + C_{pw} W) \frac{\partial \theta}{\partial y} + h_t a_{vp} (1-\varepsilon)(T-\theta) - (1-\varepsilon) \rho n_w L_g \quad (2.22)$$

Esta ecuación se puede reescribir a:

$$\boxed{\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{G_p}{\rho(1-\varepsilon)} \frac{\partial \theta}{\partial y} + \frac{h_t a_{vp} (T-\theta) - \rho n_w L_g}{\rho(C_{ps} + C_{pw} W)}} \quad (2.23)$$

La ecuación (2.23) describe la evolución puntual de la temperatura del grano con el tiempo. El primer término del lado derecho corresponde al cambio en la temperatura debido al flujo de granos. Este término será positivo cuando la

temperatura de entrada es mayor que la de salida dado que en tal caso el término $\frac{\partial \theta}{\partial y}$ será negativo haciendo que todo el término sea positivo. El segundo término, a su vez contiene dos términos de transferencia; el primero, $h_r a_{vp} (T - \theta)$ representa la transferencia de calor convectiva entre el grano y el aire. Si la temperatura del grano es menor que la del aire, este término es positivo: el aire aporta energía a los granos. El segundo representa la energía del agua evaporada, que es negativo en el proceso de secado del grano.

2.3.2.2 Balance de energía en el aire

Velocidad de acumulación de energía térmica	=	Velocidad neta de entrada de energía térmica asociada al flujo de aire	-	Velocidad de transferencia de calor convectiva hacia los granos	+	Velocidad de variación de la energía térmica debida al agua evaporada
---	---	--	---	---	---	---

El término de velocidad de acumulación de energía térmica es:

$$\rho_a \varepsilon S \Delta x \left(\frac{\partial H_a}{\partial t} \right) \quad (2.24)$$

La velocidad neta de entrada de energía térmica asociada al flujo de aire es:

$$G_a S H_{ax} - G_a S H_{ax+\Delta x} \quad (2.25)$$

El término que representa la velocidad de transferencia de calor convectiva hacia los granos es:

$$\dot{Q} = h_r a_{vp} (1 - \varepsilon) S_1 \Delta x (T - \theta) \quad (2.26)$$

La velocidad de variación de la energía térmica debida al agua evaporada es:

$$\Delta x S_1 (1 - \varepsilon) \rho n_w H_v \quad (2.27)$$

Combinando las ecuaciones (2.24) a (2.27) se obtiene el balance de energía para el aire:

$$\rho_a \varepsilon S \Delta x \left(\frac{\partial H_a}{\partial t} \right) = G_a S H_{ax} - G_a S H_{ax+\Delta x} - h_r a_{vp} (1-\varepsilon) S_1 \Delta x (T-\theta) + \Delta x S_1 (1-\varepsilon) \rho n_w H_v \quad (2.28)$$

Dividiendo por $\Delta x S_1$ y tomando límite para $\Delta x \rightarrow 0$, se tiene:

$$\rho_a \varepsilon \left(\frac{\partial H_a}{\partial t} \right) = -G_a \left(\frac{\partial H_a}{\partial x} \right) - h_r a_{vp} (1-\varepsilon) (T-\theta) + (1-\varepsilon) \rho n_w H_v \quad (2.29)$$

La entalpía del aire húmedo se calcula combinando las entalpías de aire seco y agua en estado de vapor de la siguiente manera:

$$H_a = H_{as} + H_{va} h_a \quad (2.30)$$

Donde H_{as} es la entalpía del aire seco, H_{va} es la entalpía específica del vapor de agua contenida en el aire y h_a es la humedad absoluta del aire.

Además:

$$H_{as} = C_{pa} T \quad (2.31)$$

$$H_{va} = L_{w0} + C_{pv} T \quad (2.32)$$

Reemplazando en la ecuación (2.30) las expresiones (2.31) y (2.32) se obtiene:

$$H_a = C_{pa} T + (L_{w0} + C_{pv} T) h_a$$

Derivando respecto de x ,

$$\begin{aligned} \frac{\partial H_a}{\partial x} &= C_{pa} \frac{\partial T}{\partial x} + H_{va} \frac{\partial h_a}{\partial x} + h_a \frac{\partial (L_{w0} + C_{pv} T)}{\partial x} \\ \frac{\partial H_a}{\partial x} &= C_{pa} \frac{\partial T}{\partial x} + H_{va} \frac{\partial h_a}{\partial x} + h_a C_{pv} \frac{\partial T}{\partial x} \\ \frac{\partial H_a}{\partial x} &= (C_{pa} + h_a C_{pv}) \frac{\partial T}{\partial x} + H_{va} \frac{\partial h_a}{\partial x} \end{aligned} \quad (2.33)$$

Análogamente, derivando respecto del tiempo se tiene:

$$\frac{\partial H_a}{\partial t} = (C_{pa} + h_a C_{pv}) \frac{\partial T}{\partial t} + H_{va} \frac{\partial h_a}{\partial t} \quad (2.34)$$

Reemplazando (2.33) y (2.34) en (2.29) se llega a:

$$\begin{aligned} \rho_a \varepsilon \left((C_{pa} + h_a C_{pv}) \frac{\partial T}{\partial t} + H_{va} \frac{\partial h_a}{\partial t} \right) &= -G_a \left((C_{pa} + h_a C_{pv}) \frac{\partial T}{\partial x} + H_{va} \frac{\partial h_a}{\partial x} \right) - h_r a_{vp} (1-\varepsilon)(T-\theta) + (1-\varepsilon) \rho n_w H_v \\ \rho_a \varepsilon (C_{pa} + h_a C_{pv}) \frac{\partial T}{\partial t} + H_{va} \rho_a \varepsilon \frac{\partial h_a}{\partial t} &= -G_a \left((C_{pa} + h_a C_{pv}) \frac{\partial T}{\partial x} + H_{va} \frac{\partial h_a}{\partial x} \right) - h_r a_{vp} (1-\varepsilon)(T-\theta) + (1-\varepsilon) \rho n_w H_v \end{aligned}$$

El término $\frac{\partial h_a}{\partial t}$ se obtiene de la ecuación (2.12)

$$\rho_a \varepsilon (C_{pa} + h_a C_{pv}) \frac{\partial T}{\partial t} + H_{va} \left(-G_a \frac{\partial h_a}{\partial x} + (1-\varepsilon) \rho n_w \right) = -G_a \left((C_{pa} + h_a C_{pv}) \frac{\partial T}{\partial x} + H_{va} \frac{\partial h_a}{\partial x} \right) - h_r a_{vp} (1-\varepsilon)(T-\theta) + (1-\varepsilon) \rho n_w H_v$$

Esta ecuación se simplifica a:

$$\rho_a \varepsilon (C_{pa} + h_a C_{pv}) \frac{\partial T}{\partial t} = -G_a (C_{pa} + h_a C_{pv}) \frac{\partial T}{\partial x} - h_r a_{vp} (1-\varepsilon)(T-\theta) - (1-\varepsilon) \rho n_w (H_{va} - H_v)$$

El término $(H_v - H_{va})$ se reemplaza por $C_{pv} (T - \theta)$

$$\rho_a \varepsilon (C_{pa} + h_a C_{pv}) \frac{\partial T}{\partial t} = -G_a (C_{pa} + h_a C_{pv}) \frac{\partial T}{\partial x} - (h_r a_{vp} + \rho n_w C_{pv}) (1-\varepsilon)(T-\theta) \quad (2.35)$$

Ecuación que se reescribe a:

$$\boxed{\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{G_a}{\rho_a \varepsilon} \frac{\partial T}{\partial x} - \frac{(h_r a_{vp} + \rho n_w C_{pv})(1-\varepsilon)(T-\theta)}{\rho_a \varepsilon (C_{pa} + h_a C_{pv})}} \quad (2.36)$$

La ecuación (2.36) define la variación puntual de la temperatura del aire en el tiempo. Dicha ecuación esta compuesta por dos términos, el primero se corresponde con la variación debida al flujo aire mientras que el segundo contiene dos partes; la primera relacionada con la transferencia de calor convectiva entre el grano y el aire y la segunda relacionada con la transferencia de energía debido al flujo de agua entre el

grano y el aire. Al igual que en el caso de la variación de la temperatura del grano, se puede dar que cualquiera de los términos puede ser tanto negativo como positivo. Si la temperatura del aire de entrada es mayor que la de salida, el valor de $\frac{\partial T}{\partial x}$ es negativo haciendo el término positivo. El signo del segundo término es más complejo de analizar ya que, como se mencionó, el mismo contiene dos partes. Si el aire está más caliente que el grano, se transfiere energía desde el primero al segundo. Pero si el grano se está secando, éste le transfiere energía al aire como calor latente de evaporación asociado a la transferencia de agua. El signo del segundo término dependerá entonces del peso relativo de cada una de las partes.

2.4 Parámetros de las ecuaciones de secado

A continuación se detallan las propiedades del agua y del aire que se utilizan en el desarrollo del simulador dinámico.

2.4.1 Propiedades del agua y del aire (Giner, 1999)

- Calores específicos

El calor específico del aire húmedo, C_{pah} está definido por la ecuación:

$$C_{pah} = C_{pa} + h_a C_{pv} \quad (2.37)$$

Aire seco: $C_{pa} = 1008 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$

Vapor de agua: $C_{pv} = 1883 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$

Agua líquida: $C_{pw} = 4187 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$

- Presión de saturación líquido-vapor de agua pura

$$p_s = \exp\left(54,119 - \frac{6547,1}{T + 273,16} - 4,23 \text{Ln}(T + 273,16)\right)$$

- Presión parcial de vapor en el aire húmedo

$$p_v = P \frac{h_a}{\frac{M_v}{M_a} + h_a}$$

- Calor de vaporización del agua pura:

$$L_w = \frac{RT_k^2}{M_v} \frac{\partial \ln p_s}{\partial T_k} = \frac{R}{M_v} (6547,1 - 4,23T_k)$$

2.4.2 Propiedades del grano y del lecho

- Calor específico del grano seco

$$C_{ps} = 1637 \frac{J}{Kg^\circ C} \text{ (Broker, 1992)}$$

- Densidad del grano

$$\rho_g = 1230,4 \frac{kg}{m^3} \text{ Promedio de las 25 especies publicadas por Giner (1994).}$$

En los balances de masa y energía presentados, la densidad que se debe utilizar es la densidad del sólido seco. La misma se calcula mediante la expresión (2.38):

$$\rho = \frac{\rho_g}{1+W_0} \tag{2.38}$$

Donde W_0 corresponde a la humedad a la que se determinó ρ_g , esta es:

$$W_0 = 0,22 \frac{Kg \text{ agua}}{Kg \text{ sol seco}}$$

Por lo tanto:

$$\rho = \frac{\rho_g}{1+W_0} = \frac{1230,4}{1+0,102} \frac{Kg \text{ sol seco}}{m^3}$$

$$\rho = 1116,51 \frac{Kg \text{ sol seco}}{m^3}$$

- Porosidad del lecho

$$\varepsilon = 0,41 \text{ Promedio de las 25 especies publicadas por Giner (1994)}$$

- Radio del grano

$R_g = 0.0033 \text{ m}$ Calculado a partir de los volúmenes de las 25 especies publicadas por Giner (1994)

- Área superficial de partícula por unidad de volumen

Considerando al grano como una esfera, el área superficial del mismo es:

$$A_e = 4\pi R_g^2$$

Mientras que el volumen es:

$$V_e = \frac{4}{3}\pi R_g^3$$

Por lo que a_{vp} queda:

$$a_{vp} = \frac{A_e}{V_e} = \frac{4\pi R_g^2}{\frac{4}{3}\pi R_g^3} \Rightarrow \boxed{a_{vp} = \frac{3}{R_g}} \quad (2.39)$$

- Humedad de equilibrio de los granos

Para el cálculo de la humedad de equilibrio de los granos se utiliza la isoterma de sorción de Halsey modificada:

$$W_e = 0.01 \left[\frac{-\exp(C_{1Hm}\theta + C_{2Hm})}{\text{Ln } h_r} \right]^{1/C_{3Hm}} \quad (2.40)$$

Las constantes de la ecuación utilizadas son las calculadas por Barrozo et al 1996:

$$C_{1Hm} = -0.0067$$

$$C_{2Hm} = 3.02$$

$$C_{3Hm} = 1.508$$

- Calor de sorción del agua en la soja

$$L_g = L_w + \frac{R(\theta + 273.16)^2}{M_v} \left(\frac{\partial \text{Ln } a_w}{\partial \theta} \right)_w \quad (2.41)$$

a_w es la actividad acuosa, que se que se obtiene a partir de la isoterma adecuada, en este caso la de Halsey modificada (ecuación (2.40)), que se despeja como h_r en equilibrio:

$$\ln a_w = -\exp(C_{1Hm}\theta + C_{2Hm})\left(\frac{0.01}{W}\right)^{C_{3Hm}}$$

De donde:

$$\left(\frac{\partial \ln a_w}{\partial \theta}\right)_w = -C_{1Hm} \exp(C_{1Hm}\theta + C_{2Hm})\left(\frac{0.01}{W}\right)^{C_{3Hm}}$$

Reemplazando en la ecuación (2.41), el calor de sorción queda:

$$L_g = L_w + \frac{R(\theta + 273.16)^2}{M_v} \left(-C_{1Hm} \exp(C_{1Hm}\theta + C_{2Hm})\left(\frac{0.01}{W}\right)^{C_{3Hm}} \right) \quad (2.42)$$

- Coeficiente de transferencia de calor aire-grano (h_r)

$$h_r = 3.27 C_{pa} G_a (\text{Re})^{-0.65} (\text{Pr})^{-2/3} \quad (2.43)$$

Donde:

$$\text{Re} = \frac{G_a D_g}{\mu}$$

$$\text{Pr} = \frac{\mu C_{pa}}{k_{Ta}}$$

La viscosidad (μ) en kg/ms y la conductividad térmica del aire (k_{Ta}) en W/mK están dadas por las ecuaciones (2.44) y (2.45) respectivamente (Giner, 1999)

$$\mu = C_{\mu 1} + C_{\mu 2} T \quad (2.44)$$

$$k_{Ta} = C_{kTa1} + C_{kTa2} T \quad (2.45)$$

Donde:

$$C_{\mu 1} = 1,735 \times 10^{-5} \text{ kg}/\text{ms}$$

$$C_{kTa1} = 0.0238 \text{ W}/\text{mK}$$

$$C_{\mu 2} = 4.318 \times 10^{-8} \text{ kg}/\text{ms}^\circ\text{C}$$

$$C_{kTa2} = 6.838 \times 10^{-5} \text{ W}/\text{mK}^\circ\text{C}$$

2.5 Ecuación constitutiva de transferencia de materia: velocidad de secado de granos en capa delgada

Suponiendo que el grano es esférico de volumen constante y asumiendo transporte interno por difusión líquida, el balance microscópico de materia se puede expresar de la siguiente manera (Crank, 1975)

$$\frac{\partial W_l}{\partial t} = \nabla(D\nabla W_l) \quad (2.46)$$

Donde D es el coeficiente de difusión efectivo y el subíndice l indica valor local. Si se considera flujo unidimensional radial en geometría esférica, la ecuación (2.46) se puede desarrollar como:

$$\frac{\partial W_l}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 W_l}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial W_l}{\partial r} \right) + \left(\frac{\partial W_l}{\partial r} \right)^2 \frac{\partial D}{\partial W_l}$$

Si se considera además que la difusividad es independiente del valor local de humedad durante el secado, se obtiene:

$$\frac{\partial W_l}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 W_l}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial W_l}{\partial r} \right) \quad (2.47)$$

La ecuación (2.47) está sujeta a las siguientes condiciones iniciales y de contorno.

$$t = 0 \quad W_l = W_0 \quad 0 \leq r \leq R_g \quad (2.48)$$

$$r = 0 \quad \frac{\partial W_l}{\partial r} = 0 \quad t > 0 \quad (2.49)$$

$$r = R_g \quad W_l = W_e \quad t > 0 \quad (2.50)$$

La ecuación (2.47) sujeta a estas condiciones, se puede resolver analíticamente para obtener la humedad promedio del grano. Dicha solución se presenta en la expresión (2.51).

$$W_{ad} = \frac{W - W_e}{W_o - W_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{1}{n^2} \exp \left(-n^2 \pi^2 \left(\frac{Dt}{R_g^2} \right) \right) \quad (2.51)$$

Donde W es la humedad media del grano.

El tiempo se expresa mediante el grupo adimensional propuesto en la ecuación siguiente:

$$X^2 = a_{vp}^2 Dt \quad (2.52)$$

Combinado con la ecuación (2.39), la ecuación (2.52) se reescribe a:

$$\frac{X^2}{9} = \frac{Dt}{R_g^2} \quad (2.53)$$

Reemplazando (2.53) en (2.51) se obtiene:

$$W_{ad} = \frac{W - W_e}{W_o - W_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2}{9} X^2\right) \quad (2.54)$$

Para cada tiempo, y especialmente a tiempos cortos ($X < 1$), la serie infinita (ec (2.51) ó (2.54)) requiere sumar un número considerable de términos para obtener convergencia (Giner, 1999).

Para tiempos largos ($X > 1$), la ecuación (2.51) converge a un solo término:

$$W_{ad} = \frac{W - W_e}{W_o - W_e} = \frac{6}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2}{9} a_{vp}^2 Dt\right) \quad (2.55)$$

La velocidad de secado (n_w) corresponde a la derivada de W respecto del tiempo.

Derivando la ecuación (2.55) se tiene:

$$n_w = -(W_o - W_e) \frac{2}{3} a_{vp}^2 D \exp\left(-\frac{\pi^2}{9} a_{vp}^2 Dt\right) \quad (2.56)$$

La ecuación (2.56) puede ser simplificada, despejando de la ecuación (2.55) el término que contiene al tiempo y a la humedad inicial del grano.

$$(W_o - W_e) \exp\left(-\frac{\pi^2}{9} a_{vp}^2 Dt\right) = \frac{\pi^2}{6} (W - W_e) \quad (2.57)$$

Combinando las ecuaciones (2.56) y (2.57) se obtiene la ecuación cinética simplificada para tiempos largos:

$$n_w = -\frac{\pi^2 a_{vp}^2 D}{9} (W - W_e) \quad (2.58)$$

La cinética propuesta a partir de la ecuación de tiempos largos presenta el problema que la ecuación que le da origen (ec. (2.55)), no representa correctamente los valores iniciales. De hecho, para $t=0$, se tiene $W_{ad} \approx 0.6079$ cuando en realidad debería ser $W_{ad} = 1$. Por lo que se debería disponer de otra ecuación para el inicio del proceso.

Para tiempos cortos, la serie infinita (ec. (2.51)) se puede aproximar mediante la ecuación (2.59) propuesta por Becker (1959). Esta ecuación predice la curva de secado entre $0.3 < W_{ad} < 1$ ó $X < 1$.

$$W_{ad} = \frac{W - W_e}{W_o - W_e} = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} a_{vp} \sqrt{Dt} + 0.331 a_{vp}^2 Dt \quad (2.59)$$

Expresadas en términos del grupo adimensional que contiene al tiempo (ec. (2.52)) y combinadas con la ecuación (2.39) que define el término a_{vp} para una esfera, las expresiones (2.55) y (2.59) quedan:

$$W_{ad} = \frac{W - W_e}{W_o - W_e} = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} X + 0.331 X^2 \quad (2.60)$$

$$W_{ad} = \frac{W - W_e}{W_o - W_e} = \frac{6}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2}{9} X^2\right) \quad (2.61)$$

En la Figura 2.2 se representa la humedad en función del tiempo en forma adimensional la serie infinita (ec. (2.54)), la ecuación de tiempos cortos (ec. (2.60)) y la ecuación de tiempos largos (ec. (2.61)). Como puede verse en la misma, la ecuación de tiempos cortos se aproxima correctamente a la serie infinita para $X < 1$, a partir de este valor la serie converge a la ecuación de tiempos largos.

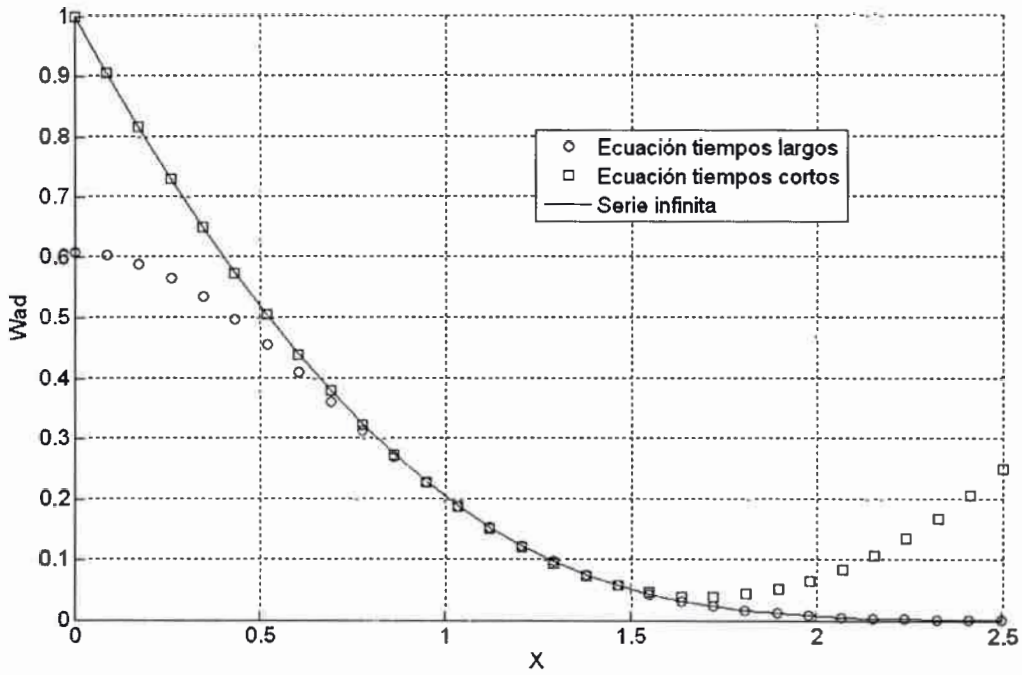


Figura 2.2. Convergencia de la serie infinita a tiempos largos, solución de Becker a tiempos cortos y serie infinita analítica para esferas.

Derivando la ecuación (2.59) para obtener la velocidad de secado para tiempos cortos, se tiene:

$$n_w = -(W - W_e) \frac{a_{vp} \sqrt{\frac{D}{\pi t}} - 0.331 a_{vp}^2 D}{1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} a_{vp} \sqrt{Dt} + 0.331 a_{vp}^2 Dt} \quad (2.62)$$

Siguiendo el mismo procedimiento que se realizó para la ecuación de tiempos largos, se despeja de la ecuación (2.59) el tiempo.

$$t = \frac{1}{D\pi (0.331 a_{vp})^2} \left(1 \pm \sqrt{1 - 0.331\pi \left(1 - \frac{W - W_e}{W_o - W_e} \right)} \right)^2 \quad (2.63)$$

Reemplazando la ecuación (2.63) en (2.62) se puede obtener la expresión de la velocidad de secado para tiempos cortos en función de la humedad del grano, de la humedad de equilibrio y de la humedad inicial del grano. Debido a que el simulador que se está desarrollando contemplará cambios en la humedad inicial o de entrada, ambas representadas en la ecuación por W_o , la expresión de la velocidad de secado no

debería depender de este valor. Esta expresión si tiene validez en un secadero de lecho fijo ya que la humedad inicial del grano no cambia en el tiempo.

Por lo planteado anteriormente, para un modelo dinámico de un secadero de flujo cruzado es necesario que la expresión cinética sea independiente de la humedad inicial, por lo cual se propone la siguiente expresión:

$$\frac{W - W_e}{W_o - W_e} = \exp(-kt) \quad (2.64)$$

Esta ecuación cumple con la condición de que para $t = 0$, $W_{ad} = 1$.

Si bien esta expresión, es empírica, en este trabajo se propone una metodología de cálculo del factor exponencial (k), que contempla conocimientos teóricos de secado. Por lo que la cinética propuesta es semi empírica.

La derivada requerida para n_w es:

$$n_w = \frac{dW}{dt} = -k \exp(-kt)(W_o - W_e) \quad (2.65)$$

Combinando las expresiones (2.64) y (2.65) se llega a:

$$\boxed{n_w = -k(W - W_e)} \quad (2.66)$$

Donde k es un parámetro cinético que depende de la temperatura de secado.

2.5.1 Cálculo del parámetro cinético k

Para determinar la funcionalidad del parámetro k , se utilizan datos experimentales presentados por Gely y Giner (2007).

Para poder ajustar y extrapolar los datos experimentales a tiempos mayores, se programó un código computacional, basado en el método de mínimos cuadrados, que utiliza la serie infinita (ec. (2.51)) para correlacionar los datos experimentales. De esta manera, se obtienen coeficientes de difusión a diferentes temperaturas. Posteriormente

se utiliza dicha ecuación para predecir la evolución temporal de la humedad del grano en capa delgada para un determinado rango de temperaturas hasta el tiempo deseado.

En la Figura 2.3, se presentan las curvas de los datos experimentales junto con las aproximaciones realizadas (utilizando los primeros 1000 términos de la expresión (2.51)). En la tabla 2.1 se muestran los resultados obtenidos en la aproximación.

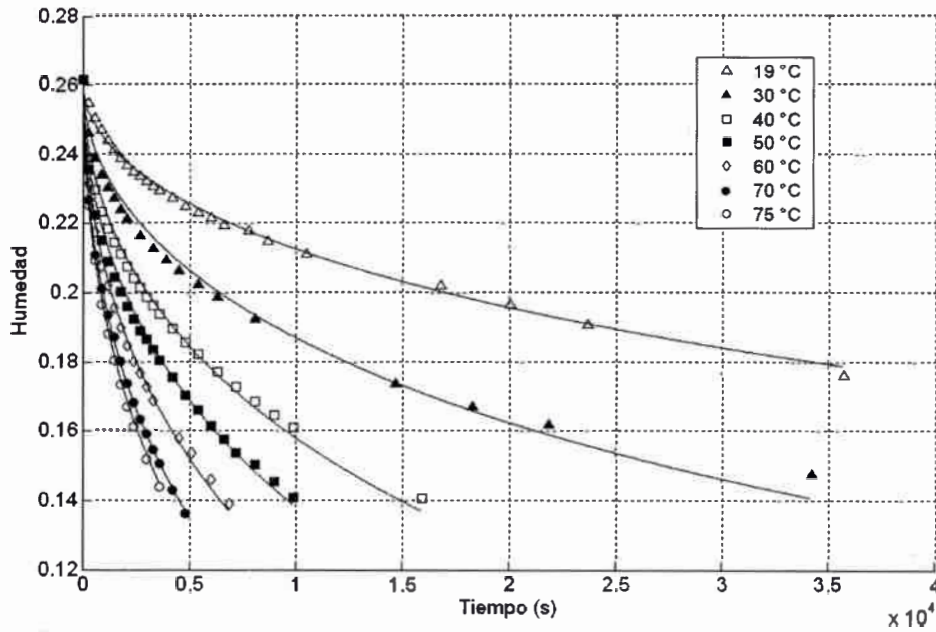


Figura 2.3. Aproximación mediante serie infinita a datos experimentales.

Tabla 2.1. Parámetros del ajuste a datos experimentales

Temp. (°C)	Difusividad $\left(\frac{m^2}{s}\right)$	R^2
19	1.5125×10^{-11}	0,9951
30	$2,2458 \times 10^{-11}$	0,9932
40	$3,0801 \times 10^{-11}$	0,9950
50	$4,1077 \times 10^{-11}$	0,9956
60	$5,7457 \times 10^{-11}$	0,9974
70	$7,9565 \times 10^{-11}$	0,9996
75	$8,7525 \times 10^{-11}$	0,9993

Para correlacionar la difusividad con la temperatura, se propone un modelo de Arrhenius (ec. (2.67)).

$$D = A \exp\left(-\frac{E_A}{RT_k}\right) \quad (2.67)$$

Donde T_k es la temperatura en Kelvin. Tomando logaritmo miembro a miembro y considerando como variable independiente a la inversa de la temperatura en la expresión (2.67), se llega a la ecuación de una recta que relaciona la difusividad con la temperatura. De esta manera, se puede hacer una regresión lineal para obtener los parámetros A y E_A .

Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 2.2. En la Figura 2.4 se muestran las difusividades obtenidas a partir de datos experimentales y los aproximados mediante el modelo de Arrhenius.

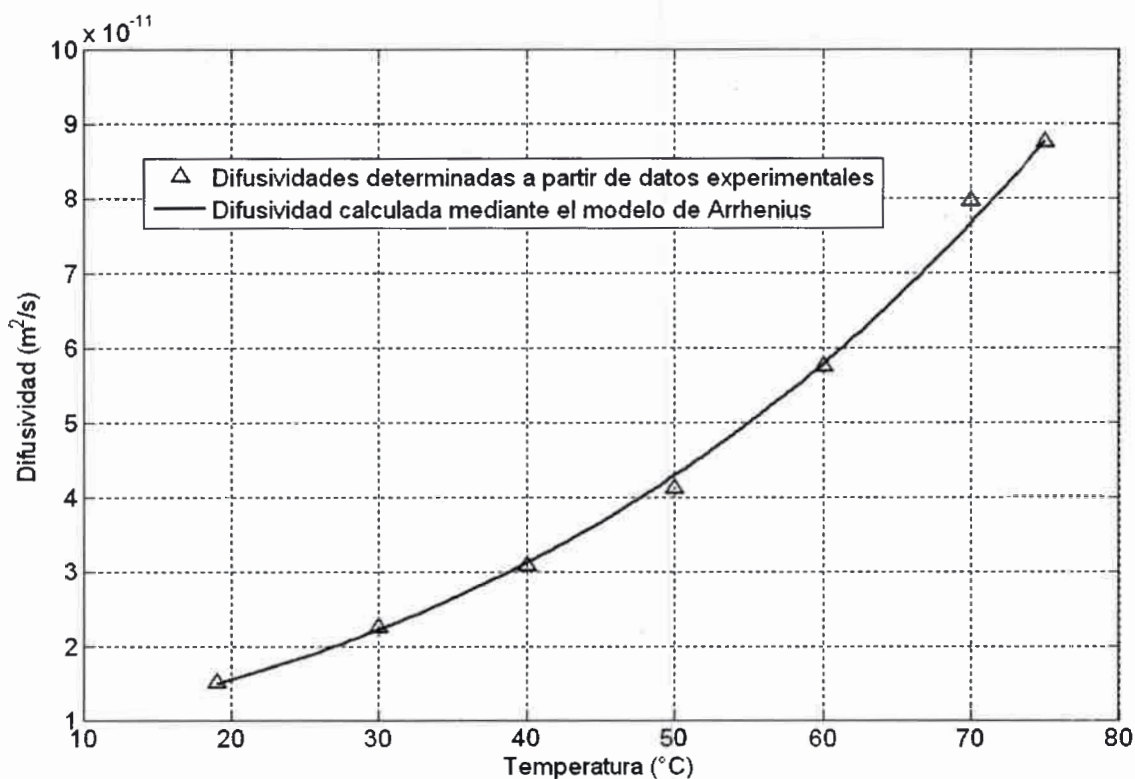


Figura 2.4. Difusividades aproximadas mediante el modelo de Arrhenius

Tabla 2.2. Parámetros del ajuste de la difusividad

Energía de activación (E_A)	A	R^2
$26764.65 \frac{J}{mol}$	$9.0889 \times 10^{-7} \frac{m^2}{s}$	0,9985

Para el cálculo de k se propone utilizar una ecuación semi empírica. Para ello se utiliza en la ecuación (2.64) el tiempo despejado de la ecuación (2.52), con lo que se obtiene:

$$\frac{W - W_e}{W_o - W_e} = \exp(-kt) = \exp\left(-\frac{k}{\alpha_{vp}^2 D} X^2\right) \quad (2.68)$$

Definiendo

$$\alpha = \frac{k}{\alpha_{vp}^2 D} \quad (2.69)$$

Se llega a:

$$\frac{W - W_e}{W_o - W_e} = \exp(-\alpha X^2) \quad (2.70)$$

La ecuación (2.54) define la humedad adimensional en función sólo del tiempo adimensionalizado (X), comparando dicha ecuación con la ecuación (2.70) se concluye que el valor de α es constante.

El valor de α se calculó mediante un código computacional basado en el método de mínimos cuadrados que aproxima los datos de humedad adimensional generados a partir de la ecuación teórica (2.54) (1000 términos) utilizando como función de ajuste la ecuación (2.70). El valor obtenido para α es 2,0461 con un coeficiente de determinación (R^2) de 0,9523. En la Figura 2.5 se muestra el ajuste obtenido conjuntamente con los datos calculados con la ecuación (2.52).

De la ecuación (2.69) se puede despejar k :

$$k = \alpha \alpha_{vp}^2 D \quad (2.71)$$

Combinando la ecuación (2.71) con la (2.67), la expresión para k queda:

$$k = \alpha \alpha_{vp}^2 A \exp\left(-\frac{E_A}{RT_K}\right) \quad (2.72)$$

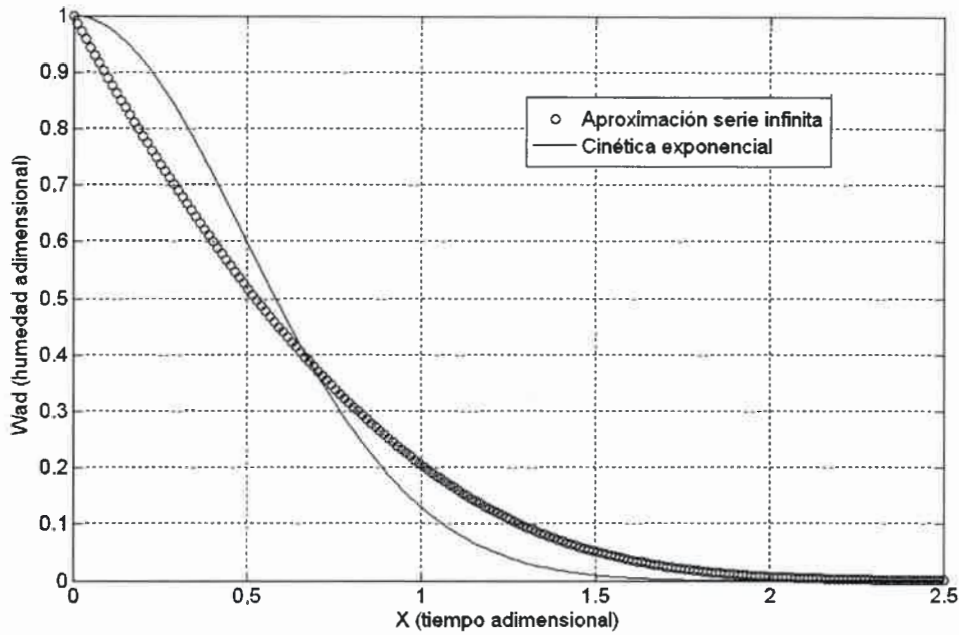


Figura 2.5. Serie infinita analítica para esferas y aproximación mediante una función exponencial.

Para comprobar la validez de la cinética propuesta, se utiliza la expresión de k para simular el secado del grano a 75°C . Esta curva se compara con los datos experimentales a dicha temperatura conjuntamente con los datos extrapolados a partir de la serie infinita. En este caso, el coeficiente de regresión es de 0.9019. Estas curvas se muestran en la Figura 2.6.

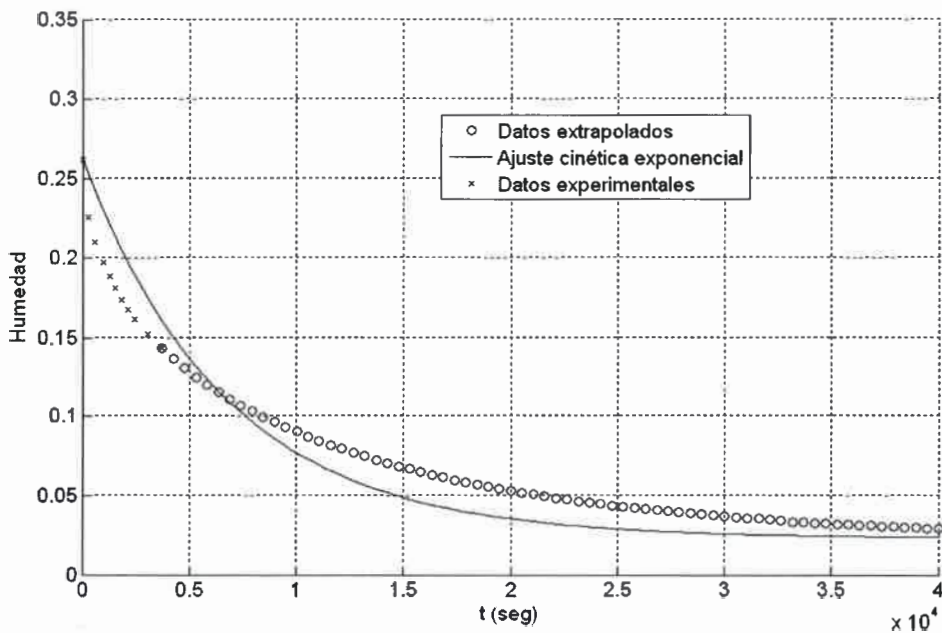


Figura 2.6. Datos experimentales extrapolados con la serie completa ajustados con la cinética exponencial.

2.5.2 Forma final de la ecuación cinética

La expresión de cinética a utilizar en el simulador se obtiene reemplazando la ecuación (2.72) en la (2.66)

$$n_w = -k(W - W_e) \quad (2.73)$$

$$k = \alpha a_{vp}^2 A \exp\left(-\frac{E_A}{RT_K}\right) \quad (2.74)$$

Los valores de las constantes involucradas en la ecuación (2.74) son:

$$R = 8.314 \frac{J}{molK}$$

$$E_A = 26764.65 \frac{J}{mol}$$

$$A = 9.0889 \times 10^{-7} \frac{m^2}{s}$$

$$\alpha = 2,0461$$

$$a_{vp}^2 = \frac{9}{R_g^2}$$

2.6 Sistema de ecuaciones del modelo

El modelo desarrollado esta compuesto por ecuaciones diferenciales y algebraicas. Las ecuaciones (2.75) a (2.78) resumen las ecuaciones diferenciales finales de los balances de masa y energía que se utilizarán en la programación del simulador. Mientras que Las ecuaciones (2.79) a (2.83) corresponden a las ecuaciones algebraicas del modelo.

$$\frac{\partial W}{\partial t} = -\frac{G_p}{\rho(1-\varepsilon)} \frac{\partial W}{\partial y} - n_w \quad (2.75)$$

$$\frac{\partial h_a}{\partial t} = -\frac{G_a}{\rho_a \varepsilon} \frac{\partial h_a}{\partial x} + \frac{(1-\varepsilon) \rho n_w}{\rho_a \varepsilon} \quad (2.76)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{G_p}{\rho(1-\varepsilon)} \frac{\partial \theta}{\partial y} + \frac{h_T a_{vp} (T - \theta) - \rho n_w Lg}{\rho(C_{ps} + C_{pW}W)} \quad (2.77)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{G_a}{\rho_a \varepsilon} \frac{\partial T}{\partial x} \frac{(h_r a_{vp} + \rho n_w C_{pv})(1-\varepsilon)(T-\theta)}{\rho_a \varepsilon (C_{pa} + h_a C_{pv})} \quad (2.78)$$

$$n_w = -k(W - W_e) \quad (2.79)$$

$$Lg = L_w + \frac{R(\theta + 273.16)^2}{M_v} \left(-C_{1Hm} \exp(C_{1Hm}\theta + C_{2Hm}) \left(\frac{0.01}{W} \right)^{C_{3Hm}} \right) \quad (2.80)$$

$$L_w = \frac{R}{M_v} (6547,1 - 4,23T_k) \quad (2.81)$$

$$W_e = 0.01 \left[\frac{-\exp(C_{1Hm}\theta + C_{2Hm})}{Ln h_r} \right]^{1/C_{3Hm}} \quad (2.82)$$

$$h_r = 3.27 C_{pa} G_a (Re)^{-0.65} (Pr)^{-2/3} \quad (2.83)$$

Como puede verse en las ecuaciones precedentes, las variables del sistema dependen de las coordenadas espaciales y del tiempo (x, y, t) . Si se quiere analizar la respuesta dinámica del sistema en la puesta en marcha del equipo para un conjunto de valores de las variables, las condiciones de borde e iniciales que se deben utilizar son las que se muestran en la tabla 2.3.

Tabla 2.3. Condiciones de borde e iniciales para la puesta en marcha

Condiciones de borde	Condiciones iniciales
$W(x, 0, t) = W_{in}$	$W(x, y, 0) = W_0$
$h_a(0, y, t) = h_{ain}$	$h_a(x, y, 0) = h_{a0}$
$\theta(x, 0, t) = \theta_{in}$	$\theta(x, y, 0) = \theta_0$
$T(0, y, t) = T_{in}$	$T(x, y, 0) = T_0$

En este caso, las condiciones de borde no dependen del tiempo ya que se consideran constantes. Por otro lado, las condiciones iniciales no dependen del espacio, ya que se considera que todos los granos a secar tienen el mismo contenido de humedad (W_0) y temperatura (θ_0) y que todo el aire dentro del equipo tiene la misma humedad absoluta (h_{a0}) y temperatura (T_0) al comenzar el proceso.

Debido a que se está desarrollando un simulador que permita analizar la dinámica del sistema frente a cambios en el tiempo de las variables operativas, las

condiciones de borde deben ser función del tiempo. Por otro lado, si el sistema ya está operando en un determinado estado (estacionario o no) y se quiere analizar la evolución hacia un nuevo estado a partir de una determinada perturbación en alguna variable operativa, las condiciones iniciales de las variables de estado serán función de las coordenadas espaciales del secadero (x, y) . En función de lo anterior, el sistema de ecuaciones diferenciales está sujeto a las condiciones iniciales y de borde presentadas en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4. Condiciones de borde e iniciales generales

Condiciones de borde	Condiciones iniciales
$W(x, 0, t) = W_{in}(t)$	$W(x, y, 0) = W_0(x, y)$
$h_a(0, y, t) = h_{ain}(t)$	$h_a(x, y, 0) = h_{a0}(x, y)$
$\theta(x, 0, t) = \theta_{in}(t)$	$\theta(x, y, 0) = \theta_0(x, y)$
$T(0, y, t) = T_{in}(t)$	$T(x, y, 0) = T_0(x, y)$

2.7 Caso de estudio

Teniendo en cuenta los valores comúnmente empleados en una situación real se define un caso de estudio, representativo del secado de soja en flujo cruzado, que será utilizado para cada uno de los análisis que se realizan en los capítulos que siguen.

Dimensiones del secadero:

Longitud (L_y): 20 m

Ancho (L_x): 0,30 m

Caudales:

Flujo de granos de $2,5 \frac{kg}{m^2 s}$

Flujo de aire seco de $0,3 \frac{kg}{m^2 s}$

Las condiciones de borde e iniciales se resumen en la Tabla 2.5

Tabla 2.5. Condiciones de borde e iniciales utilizadas en el análisis

Condiciones de borde	Condiciones iniciales
$W(x, 0, t) = 0.2$	$W(x, y, 0) = 0.2$
$h_a(0, y, t) = 0.0139$	$h_a(x, y, 0) = 0.0139$
$\theta(x, 0, t) = 25^{\circ}C$	$\theta(x, y, 0) = 25^{\circ}C$
$T(0, y, t) = 70^{\circ}C$	$T(x, y, 0) = 25^{\circ}C$

$h_a(0, y, t)$ corresponde a la humedad absoluta del aire a la temperatura de entrada y una humedad relativa ambiente del 70%. Se considera que el secadero trabaja a la presión de 1 atm.

CAPÍTULO 3: RESOLUCIÓN NUMÉRICA DEL MODELO
MATEMÁTICO

3.1 Introducción

En el capítulo anterior se obtuvo el modelo del secadero, que consiste en un sistema de cuatro ecuaciones diferenciales a derivadas parciales (EDPs) con sus ecuaciones algebraicas auxiliares y describe el comportamiento temporal y espacial de las cuatro variables: humedad y temperatura de los granos y del aire de secado.

El método numérico adecuado para resolver un sistema depende del tipo de ecuaciones que lo componen.

En primera instancia puede distinguirse entre ecuaciones lineales y no lineales, con coeficientes constantes o variables. El orden de la ecuación está determinado por el orden más alto de las derivadas que intervienen en la ecuación.

Para las EDPs lineales de segundo orden se utiliza un método de clasificación basado en el valor del discriminante (D) calculado con los coeficientes de la ecuación, que permite distinguir entre ecuaciones hiperbólicas ($D > 0$), parabólicas ($D = 0$) y elípticas ($D < 0$), mientras que la clasificación de las EDPs generales no es tan clara o definida. Si los coeficientes son variables, un tipo de ecuación puede variar de una región a otra, y si hay más de una ecuación en el sistema, cada ecuación puede ser de tipo diferente. Además el problema puede ser no lineal y de distintos órdenes o dimensiones. Sin embargo, estos términos se utilizan también para describir las EDPs, aunque el significado no sea tan preciso ni riguroso:

-EDPs hiperbólicas: describen un proceso físico conservativo, dependiente del tiempo, que no evoluciona hacia un estado estacionario.

-EDPs parabólicas: describen un proceso físico disipativo, dependiente del tiempo, que evoluciona hacia un estado estacionario.

-EDPs elípticas: describen sistemas que ya han alcanzado el estado estacionario o el equilibrio, y por lo tanto no dependen del tiempo. (Heath, 2002).

Según estos criterios, el sistema a resolver puede definirse como un sistema de EDPs parabólicas no lineales de primer orden. Queda definido un problema de valor inicial sujeto a condiciones iniciales y de borde de primera clase o tipo Dirichlet.

Los métodos numéricos que pueden utilizarse para resolver este sistema pueden ser:

-Métodos Semidiscretos. Se discretiza el espacio, pero no el tiempo, resultando un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias (ODE). Un ejemplo de estos métodos es el Método de las Líneas.

-Métodos Completamente Discretos. Todas las variables independientes se discretizan, incluyendo el tiempo. Se introduce una grilla de puntos de malla en todo el dominio del problema en espacio y tiempo, se reemplazan las derivadas por aproximaciones en diferencias finitas y se busca un valor aproximado para la solución en cada punto de la grilla. Resulta un sistema de ecuaciones algebraicas, cuyas incógnitas son los valores de la solución en los puntos de la malla.

En principio no hay una distinción real entre métodos discretos o semidiscretos, dado que la variable tiempo finalmente se discretiza en ambos casos, pero hay una distinción práctica importante: en un método semidiscreto se le da a un paquete de software sofisticado, que adapta el tamaño de paso de tiempo de modo de mantener la estabilidad y lograr la exactitud deseada, mientras que en un método completamente discreto el usuario debe elegir explícitamente el tamaño del paso de tiempo para cumplir con esos objetivos (Constantinides y Mostoufi, 1999; Hoffman, 1992).

En este trabajo se utiliza el método de las líneas. Para ello el sistema es dividido en una malla de $m \times n$ nodos y se discretizan las derivadas parciales espaciales incluidas en el sistema mediante diferencias finitas, resultando un sistema de EDOs que tendrá un número de ecuaciones dependiente del tamaño de malla. Se realiza un análisis de influencia del tamaño de la malla en los valores finales de humedad y temperatura y en el tiempo de cálculo requerido para resolver el problema.

3.2 Discretización de las derivadas parciales espaciales

En la Figura 3.1 se muestra un esquema de la malla de $m \times n$ nodos en que se divide el secadero para el planteo de las EDOs. Quedarán cuatro EDOs en cada nodo, una para cada una de las variables: humedad y temperatura de granos y aire.

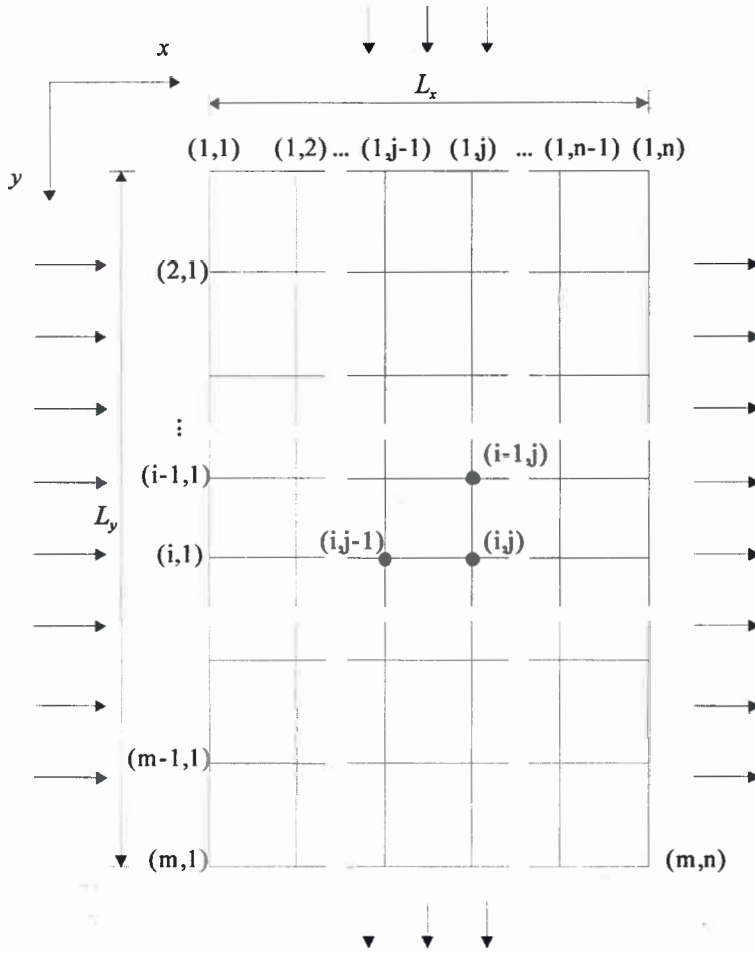


Figura 3.1 Esquema del secadero dividido en una malla de $m \times n$ nodos.

Las derivadas parciales espaciales se discretizan mediante diferencias finitas hacia atrás para cada uno de los nodos (i, j) que cumplen con $i > 1$ y $j > 1$:

$$\frac{\partial W_{(i,j)}}{\partial y} \approx \frac{W_{(i,j)} - W_{(i-1,j)}}{\Delta y} \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial h_{a(i,j)}}{\partial x} \approx \frac{h_{a(i,j)} - h_{a(i,j-1)}}{\Delta x} \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial \theta_{(i,j)}}{\partial y} \approx \frac{\theta_{(i,j)} - \theta_{(i-1,j)}}{\Delta y} \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial T_{(i,j)}}{\partial x} \approx \frac{T_{(i,j)} - T_{(i,j-1)}}{\Delta x} \quad (3.4)$$

Para $i=1, \forall j$ y para $j=1, \forall i$ no se pueden discretizar las derivadas espaciales con diferencias finitas hacia atrás ya que uno de los subíndices de las variables

resultarían negativos. Igualmente no es necesario definir las derivadas espaciales en estos nodos mediante alguna otra discretización ya que para dichos nodos las derivadas temporales son nulas para poder cumplir con las condiciones de borde. De esta manera, a fines prácticos en el simulador se las define como nulas.

Para $i = 1, \forall j$

$$\frac{\partial W_{(i,j)}}{\partial y} = 0 \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial \theta_{(i,j)}}{\partial y} = 0 \quad (3.6)$$

Para $j = 1, \forall i$

$$\frac{\partial h_{a(i,j)}}{\partial x} = 0 \quad (3.7)$$

$$\frac{\partial T_{(i,j)}}{\partial x} = 0 \quad (3.8)$$

Los valores de Δx y Δy se calculan a partir de las ecuaciones (3.9) y (3.10)

$$\Delta x = \frac{L_x}{n-1} \quad (3.9)$$

$$\Delta y = \frac{L_y}{m-1} \quad (3.10)$$

3.3 Modelo matemático del secadero expresado en función de las derivadas parciales espaciales discretizadas

El sistema, que estaba definido originalmente por 4 ecuaciones diferenciales a derivadas parciales, se ha transformado así en un sistema de $4 \times m \times n$ ecuaciones diferenciales ordinarias ó totales (respecto del tiempo):

$$\frac{dW_{(i,j)}}{dt} = -\frac{G_p}{\rho(1-\varepsilon)} \frac{W_{(i,j)} - W_{(i-1,j)}}{\Delta y} - n_w \quad \forall \begin{cases} 1 < i \leq m \\ 1 \leq j \leq n \end{cases} \quad (3.11)$$

$$\frac{dW_{(i,j)}}{dt} = 0 \quad \forall \begin{cases} i = 1 \\ 1 \leq j < n \end{cases} \quad (3.12)$$

$$\frac{dh_{a(i,j)}}{dt} = -\frac{G_a}{\rho_a \varepsilon} \frac{h_{a(i,j)} - h_{a(i,j-1)}}{\Delta x} + \frac{(1-\varepsilon)\rho n_w}{\rho_a \varepsilon} \forall \begin{cases} 1 \leq i \leq m \\ 1 < j \leq n \end{cases} \quad (3.13)$$

$$\frac{dh_{a(i,j)}}{dt} = 0 \forall \begin{cases} 1 \leq i \leq m \\ j = 1 \end{cases} \quad (3.14)$$

$$\frac{d\theta_{(i,j)}}{dt} = -\frac{G_p}{\rho(1-\varepsilon)} \frac{\theta_{(i,j)} - \theta_{(i-1,j)}}{\Delta y} + \frac{h_{T(i,j)} a_{vp} (T_{(i,j)} - \theta_{(i,j)}) - \rho n_w Lg}{\rho(C_{ps} + C_{pw} W_{(i,j)})} \forall \begin{cases} 1 < i \leq m \\ 1 \leq j \leq n \end{cases} \quad (3.15)$$

$$\frac{d\theta_{(i,j)}}{dt} = 0 \forall \begin{cases} i = 1 \\ 1 \leq j \leq n \end{cases} \quad (3.16)$$

$$\frac{dT_{(i,j)}}{dt} = -\frac{G_a}{\rho_a \varepsilon} \frac{T_{(i,j)} - T_{(i,j-1)}}{\Delta x} - \frac{(h_{T(i,j)} a_{vp} + \rho n_w C_{pv})(1-\varepsilon)(T_{(i,j)} - \theta_{(i,j)})}{\rho_a \varepsilon (C_{pa} + h_a C_{pv})} \forall \begin{cases} 1 \leq i \leq m \\ 1 < j \leq n \end{cases} \quad (3.17)$$

$$\frac{dT_{(i,j)}}{dt} = 0 \text{ para } \begin{cases} i = 1 \\ 1 \leq j \leq n \end{cases} \quad (3.18)$$

En Tabla 3.1 se presentan las condiciones iniciales y de condiciones de borde necesarias para resolver el sistema de ecuaciones planteado. Dado que deben establecerse las condiciones en cada nodo, queda definida una matriz de dimensiones $m \times n$ condiciones

Tabla 3.1. Condiciones iniciales y de borde para el sistema discretizado

Condiciones de borde	Condiciones iniciales
$W_{(1,j)}(t) = W_{in}(t)$	$W_{(i>1,j)}(0) = W_0(x, y)$
$h_{a(i,1)}(t) = h_{am}(t)$	$h_{a(i,j>1)}(0) = h_{a0}(x, y)$
$\theta_{(1,j)}(t) = \theta_{in}(t)$	$\theta_{(i>1,j)}(0) = \theta_0(x, y)$
$T_{(i,1)}(t) = T_{in}(t)$	$T_{(i,j>1)}(0) = T_0(x, y)$

El sistema se resolvió utilizando el software Matlab. Para ello se escribió una función en la que se define el sistema que luego se resuelve utilizando los algoritmos para ecuaciones diferenciales ordinarias provistos en MatLab (familia de ecuaciones ODE).

3.4 Influencia del tamaño de la malla

El análisis de la presente sección se realiza para el caso de estudio definido en al sección 2.7.

Debido a que el proceso de transporte de masa y energía en el aire es miles de veces más rápido que en el grano, el sistema de ecuaciones diferenciales es del tipo rígido (Platt et al., 1991), para este tipo de problemas se recomienda utilizar la función ode15s. Además la misma ha sido desarrollada para sistemas diferenciales – algebraicos (Shampine y Reichelt, 1997). Si bien se probaron otras alternativas, la función ode15s resultó la más eficiente. A modo de ejemplo, para una malla 20×5 y un tiempo de secado de 10000 segundos, la función ode45 (basada en el método de Runge-Kutta 4,5) requiere aproximadamente 2700 segundos para resolver el sistema, la función ode23s (basada en el método de Rosenbrock modificado de orden dos) requiere aproximadamente 23 segundos, mientras que la función ode15s lo resuelve en 1,5 segundos. El tiempo de secado es el suficiente para que, desde el punto de vista práctico, el sistema alcance el estado estacionario, tal como se muestra en la Figura 3.2.

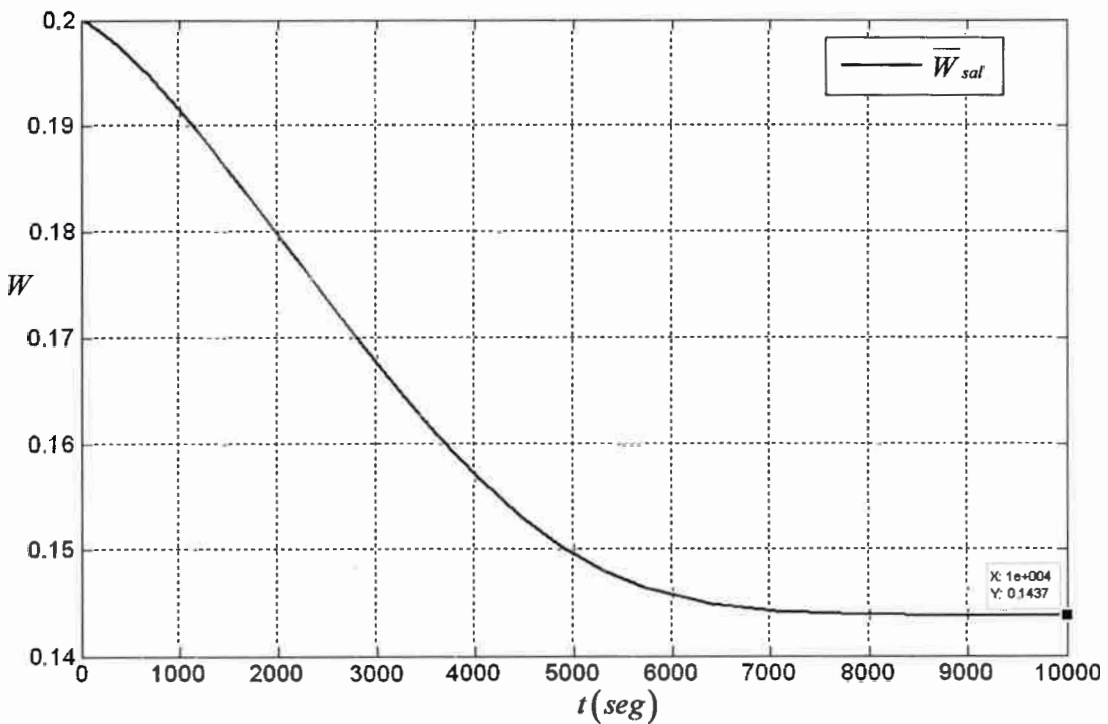


Figura 3.2. Evolución de la humedad a la salida del secadero hasta alcanzar el estado estacionario

A medida que se incrementa el tamaño de la malla, se obtiene mayor precisión en la solución y se tiene mayor cantidad de información de las variables involucradas a lo largo del secadero. No obstante, el tiempo de resolución aumenta. De esta manera, surge la necesidad de estudiar el tamaño de malla para seleccionar el valor óptimo, a fin de tener la información suficiente en el menor tiempo de cómputo posible, requisitos necesarios para un simulador a aplicar en el control automático del equipo.

Se realizan simulaciones para un tiempo de secado de 10.000 segundos y con diferentes tamaños de malla a efectos de estudiar la influencia de esta variable, tanto en el tiempo de cálculo como en los valores promedios de las variables de interés a la salida del secadero (humedad y temperatura del grano, humedad y temperatura del aire). En las Tablas 3.2 a 3.6 se muestran los resultados de este análisis.

Tabla 3.2. Tiempo de cálculo (segundos)

		Nodos en la dirección del grano									
		5	7	10	12	15	20	25	30	35	40
Nodos en la dirección del aire	3	1,2	1,5	1,7	2,3	3,2	5,3	8,1	11,5	15,5	20,4
	5	1,3	2,2	3,9	5,3	8,1	14,0	21,9	31,8	43,8	58,1
	7	2,2	3,7	7,1	10,0	15,4	27,6	43,6	64,3	89,8	121,0
	10	3,8	7,1	13,9	20,1	31,8	58,0	93,9	141,3	201,3	277,1
	12	5,3	10,0	20,1	29,3	46,3	85,7	140,9	214,4	309,1	432,2
	15	8,1	15,3	31,7	46,2	74,5	141,2	236,2	366,1	538,6	765,4
	20	13,9	27,5	58,0	85,5	140,6	275,8	475,0	766,7	1162,0	1672,9

Tabla 3.3. Humedad promedio del grano a la salida del secadero

		Nodos en la dirección del grano									
		5	7	10	12	15	20	25	30	35	40
Nodos en la dirección del aire	3	0,1437	0,1427	0,1420	0,1418	0,1416	0,1414	0,1413	0,1412	0,1411	0,1411
	5	0,1459	0,1449	0,1443	0,1441	0,1439	0,1437	0,1436	0,1436	0,1435	0,1435
	7	0,1467	0,1457	0,1451	0,1449	0,1448	0,1446	0,1445	0,1445	0,1444	0,1444
	10	0,1473	0,1463	0,1458	0,1456	0,1454	0,1453	0,1452	0,1451	0,1451	0,1451
	12	0,1475	0,1466	0,1460	0,1458	0,1457	0,1455	0,1454	0,1454	0,1454	0,1453
	15	0,1478	0,1468	0,1462	0,1461	0,1459	0,1458	0,1457	0,1457	0,1456	0,1456
	20	0,1480	0,1470	0,1465	0,1463	0,1461	0,1460	0,1459	0,1459	0,1459	0,1459

Tabla 3.4. Temperatura promedio del grano a la salida del secadero

		Nodos en la dirección del grano									
		5	7	10	12	15	20	25	30	35	40
Nodos en la dirección del aire	3	58,9	59,1	59,2	59,2	59,2	59,2	59,2	59,3	59,3	59,3
	5	58,2	58,4	58,5	58,6	58,6	58,6	58,6	58,6	58,6	58,6
	7	58,0	58,2	58,3	58,3	58,3	58,4	58,4	58,4	58,4	58,4
	10	57,8	58,0	58,1	58,2	58,2	58,2	58,2	58,2	58,2	58,2
	12	57,8	58,0	58,1	58,1	58,1	58,1	58,1	58,1	58,2	58,2
	15	57,7	57,9	58,0	58,0	58,1	58,1	58,1	58,1	58,1	58,1
	20	57,7	57,9	58,0	58,0	58,0	58,0	58,0	58,0	58,0	58,0

Tabla 3.5. Humedad promedio del aire a la salida del secadero

		Nodos en la dirección del grano									
		5	7	10	12	15	20	25	30	35	40
Nodos en la dirección del aire	3	0,0188	0,0191	0,0193	0,0194	0,0194	0,0195	0,0196	0,0196	0,0196	0,0197
	5	0,0190	0,0193	0,0196	0,0197	0,0198	0,0199	0,0199	0,0200	0,0200	0,0200
	7	0,0191	0,0195	0,0197	0,0198	0,0199	0,0200	0,0201	0,0201	0,0201	0,0201
	10	0,0192	0,0195	0,0198	0,0199	0,0200	0,0201	0,0201	0,0202	0,0202	0,0202
	12	0,0192	0,0196	0,0198	0,0199	0,0200	0,0201	0,0202	0,0202	0,0202	0,0203
	15	0,0193	0,0196	0,0198	0,0199	0,0200	0,0201	0,0202	0,0202	0,0203	0,0203
	20	0,0193	0,0196	0,0199	0,0200	0,0201	0,0202	0,0202	0,0203	0,0203	0,0203

Tabla 3.6. Temperatura promedio del aire a la salida del secadero

		Nodos en la dirección del grano									
		5	7	10	12	15	20	25	30	35	40
Nodos en la dirección del aire	3	40,2	41,1	41,8	42,0	42,3	42,6	42,7	42,8	42,9	43,0
	5	38,9	39,7	40,4	40,6	40,8	41,1	41,2	41,3	41,4	41,4
	7	38,5	39,2	39,8	40,1	40,3	40,5	40,7	40,7	40,8	40,9
	10	38,1	38,9	39,5	39,7	39,9	40,1	40,3	40,4	40,4	40,5
	12	38,0	38,8	39,3	39,5	39,8	40,0	40,1	40,2	40,3	40,3
	15	37,9	38,6	39,2	39,4	39,6	39,8	40,0	40,1	40,1	40,2
	20	37,8	38,5	39,1	39,3	39,5	39,7	39,8	39,9	40,0	40,0

Para facilitar la interpretación de los datos presentados en las tablas precedentes, los datos son modificados de la siguiente manera: se dividen los tiempos por el menor valor obtenido, que corresponde a la malla de 5×3. En el resto de las tablas se calcula la diferencia relativa respecto del valor obtenido con el tamaño de malla mayor (40×20) que se considera el más preciso. De esta manera se puede saber cuan mayor es el tiempo de cálculo, así como cual es la diferencia de los valores de las variables calculadas, con relación al valor considerado más preciso. Para visualizar rápidamente éstas diferencias, se resaltan con diferentes colores: en verde las menores

al 2%, en amarillo las que están entre el 2% y el 5% y en rojo los restantes. Esta información se detalla en las Tablas 3.7 a 3.11

Tabla 3.7. Relación entre el tiempo de cálculo para cada tamaño de malla y para el tamaño de malla menor (5×3).

$n \backslash m$	5	7	10	12	15	20	25	30	35	40
3	1,0	1,3	1,5	1,9	2,7	4,5	6,9	9,7	13,1	17,3
5	1,1	1,8	3,3	4,5	6,9	11,9	18,6	27,0	37,1	49,3
7	1,8	3,1	6,0	8,5	13,0	23,4	37,0	54,5	76,1	102,6
10	3,3	6,0	11,8	17,1	26,9	49,1	79,6	119,7	170,6	234,8
12	4,5	8,4	17,0	24,8	39,2	72,6	119,4	181,7	261,9	366,3
15	6,9	13,0	26,9	39,2	63,1	119,6	200,1	310,3	456,4	648,7
20	11,8	23,3	49,1	72,5	119,1	233,8	402,5	649,8	984,8	1417,7

Tabla 3.8. Diferencia relativa entre la humedad final promedio del grano, obtenida para un determinado tamaño de malla y la obtenida para la malla mayor (40×20)

$n \backslash m$	5	7	10	12	15	20	25	30	35	40
3	1,5%	2,2%	2,7%	2,8%	2,9%	3,1%	3,2%	3,2%	3,2%	3,3%
5	0,0%	0,7%	1,1%	1,2%	1,4%	1,5%	1,5%	1,6%	1,6%	1,6%
7	0,6%	0,1%	0,5%	0,6%	0,7%	0,8%	0,9%	0,9%	1,0%	1,0%
10	1,0%	0,3%	0,1%	0,2%	0,3%	0,4%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%
12	1,1%	0,5%	0,1%	0,0%	0,1%	0,2%	0,3%	0,3%	0,3%	0,4%
15	1,3%	0,6%	0,3%	0,1%	0,0%	0,1%	0,1%	0,1%	0,2%	0,2%
20	1,4%	0,8%	0,4%	0,3%	0,2%	0,1%	0,1%	0,0%	0,0%	0%

Tabla 3.9. Diferencia relativa entre la temperatura final promedio del grano, obtenida para un determinado tamaño de malla y la obtenida para la malla mayor (40×20)

$n \backslash m$	5	7	10	12	15	20	25	30	35	40
3	1,4%	1,8%	1,9%	2,0%	2,0%	2,1%	2,1%	2,1%	2,1%	2,1%
5	0,3%	0,7%	0,8%	0,9%	0,9%	0,9%	1,0%	1,0%	1,0%	1,0%
7	0,1%	0,3%	0,4%	0,5%	0,5%	0,5%	0,6%	0,6%	0,6%	0,6%
10	0,4%	0,0%	0,2%	0,2%	0,2%	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%
12	0,5%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%
15	0,5%	0,2%	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%
20	0,6%	0,3%	0,1%	0,1%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0%

Tabla 3.10. Diferencia relativa entre la humedad final promedio del aire, obtenida para un determinado tamaño de malla y la obtenida para la malla mayor (40×20)

$n \backslash m$	5	7	10	12	15	20	25	30	35	40
3	7,6%	6,2%	5,2%	4,7%	4,3%	3,9%	3,6%	3,5%	3,3%	3,2%
5	6,3%	4,8%	3,6%	3,2%	2,7%	2,2%	2,0%	1,8%	1,6%	1,5%
7	5,9%	4,3%	3,0%	2,6%	2,1%	1,6%	1,3%	1,1%	1,0%	0,9%
10	5,5%	3,9%	2,6%	2,2%	1,7%	1,2%	0,9%	0,7%	0,6%	0,5%
12	5,4%	3,7%	2,5%	2,0%	1,5%	1,0%	0,7%	0,5%	0,4%	0,3%
15	5,3%	3,6%	2,3%	1,9%	1,4%	0,9%	0,6%	0,4%	0,3%	0,2%
20	5,2%	3,5%	2,2%	1,7%	1,2%	0,7%	0,4%	0,2%	0,1%	0,0%

Tabla 3.11. Diferencia relativa entre la temperatura final promedio del aire, obtenida para un determinado tamaño de malla y la obtenida para la malla mayor (40×20)

$n \backslash m$	5	7	10	12	15	20	25	30	35	40
3	0,3%	2,6%	4,3%	4,9%	5,6%	6,3%	6,7%	7,0%	7,1%	7,3%
5	2,8%	0,8%	0,8%	1,4%	1,9%	2,6%	2,9%	3,2%	3,3%	3,5%
7	4,0%	2,0%	0,6%	0,0%	0,6%	1,2%	1,5%	1,7%	1,9%	2,0%
10	4,8%	2,9%	1,5%	0,9%	0,4%	0,2%	0,5%	0,8%	0,9%	1,1%
12	5,1%	3,2%	1,8%	1,3%	0,7%	0,2%	0,2%	0,4%	0,6%	0,7%
15	5,4%	3,5%	2,2%	1,6%	1,1%	0,5%	0,2%	0,1%	0,2%	0,3%
20	5,7%	3,9%	2,5%	1,9%	1,4%	0,8%	0,5%	0,3%	0,1%	0,0%

Como puede observarse en la Tabla 3.7, el tiempo de cálculo depende en gran medida de la cantidad de nodos: para el tamaño de malla menor es del orden de 1 seg y para el mayor es de 1600 segundos. Aunque el tiempo de cálculo no depende de la forma en se combinen m y n para conformar la malla. Por ejemplo si la cantidad de nodos es 300, hay 4 combinaciones posibles 30×10, 25×12, 20×15 y 15×20, y en todos los casos el tiempo requerido es de aproximadamente 119 segundos.

Los resultados que se obtienen en las variables del grano no difieren demasiado respecto de la obtenida con el mayor tamaño de malla, aunque no sucede lo mismo con las variables referidas al aire. En este caso se obtienen diferencias cercanas al 8% en algunos casos. De esto se deduce que para obtener un valor aceptable de las variables calculadas el tamaño mínimo de malla debería ser 7x5

3.5 Conclusiones

Se desarrolló un simulador dinámico a partir de las ecuaciones diferenciales a derivadas parciales y las ecuaciones algebraicas auxiliares presentadas en el capítulo 2. Para ello se aplicó el método de las líneas: se dividió al secadero en una malla de $m \times n$ nodos y se discretizaron las derivadas espaciales para obtener un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias para cada uno de los nodos.

El tamaño de malla influye en los resultados de simulación, tanto en el tiempo de cálculo como en los valores de las variables calculadas. No se observan diferencias en el tiempo de cálculo si la cantidad de nodos total se mantiene constante, no obstante existe mayor precisión en los cálculos cuantos más nodos se utilizan.

Si se requiere un resultado aproximado y poco tiempo de cálculo se puede utilizar un tamaño de malla pequeño como 10×5 . En el caso de que el tiempo de cálculo no sea una variable a considerar y se requiera tener perfiles definidos con mayor precisión, se pueden utilizar mallas más grandes como por ejemplo de 40×20 . Si se requiere un buen conocimiento de la distribución de la humedad del grano dentro del secadero, como en el control automático, y que el tiempo de cálculo no sea demasiado elevado, se debe utilizar un tamaño de malla intermedio (40×5).

**CAPÍTULO 4: SENSIBILIDAD PARAMÉTRICA DEL
MODELO MATEMÁTICO**

4.1 Introducción

En el desarrollo del modelo matemático, se ha considerado que algunos parámetros (propiedades físicas, constantes de la cinética de secado y del coeficiente de transferencia de calor) se mantienen constantes tanto con la posición como con el tiempo. En este capítulo se analiza la validez de esta hipótesis, determinando la sensibilidad del modelo frente a cambios en dichos parámetros.

Inicialmente se realiza un análisis de sensibilidad paramétrica mediante el método derivativo, a través de los coeficientes de sensibilidad, para determinar los parámetros de mayor influencia. Luego se lleva a cabo un estudio estadístico de este conjunto de parámetros más relevantes por el método de análisis de varianza.

Las dimensiones del equipo, flujos de grano y aire, condiciones iniciales y de borde utilizadas en las simulaciones realizadas en el análisis de sensibilidad son las detalladas en la sección 2.7.

4.2 Análisis de sensibilidad mediante el método derivativo

El método derivativo, consiste en determinar las derivadas de las variables φ_i (W, θ, h, T) respecto de los parámetros P_i . Estas derivadas constituyen los coeficientes de sensibilidad.

$$\frac{\partial W}{\partial P_i} = \text{coeficiente de sensibilidad de } W \text{ respecto del parámetro } P_i$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial P_i} = \text{coeficiente de sensibilidad de } \theta \text{ respecto del parámetro } P_i$$

$$\frac{\partial h}{\partial P_i} = \text{coeficiente de sensibilidad de } h \text{ respecto del parámetro } P_i$$

$$\frac{\partial T}{\partial P_i} = \text{coeficiente de sensibilidad de } T \text{ respecto del parámetro } P_i$$

A efectos de posibilitar la comparación de los coeficientes de sensibilidad se realiza un escalado de los mismos multiplicándolos por la relación $\frac{P_i}{\varphi_i}$.

Los coeficientes de sensibilidad se calculan numéricamente, para ello se realizan simulaciones variando de a uno por vez cada uno de los parámetros estudiados. En la Tabla 4.1 se detallan los parámetros contemplados en el análisis de sensibilidad del modelo mediante el método derivativo.

Las variaciones que se realizan de cada uno de los parámetros son del $\pm 1\%$, manteniendo el mismo en el entorno del valor utilizado en el simulador. Para aquellos parámetros que provienen de una ecuación algebraica como en el caso de la velocidad de secado (k) que dependen de varias constantes y/o variables, para analizar su sensibilidad se lo multiplica por una constante, la cual es variada de igual modo que los demás parámetros, es decir $\pm 1\%$.

Tabla 4.1: Parámetros contemplados en el análisis de sensibilidad del modelo mediante el método derivativo.

	Cantidad de parámetros	Parámetros
Propiedades del grano y lecho	4	$a_{vp}, C_{ps}, \rho, \varepsilon$
Propiedades del aire	4	$\rho_a, \mu, k_{Ta}, C_{pa}$
Propiedades del agua	2	C_{pw}, C_{pv}
Presión de saturación	1	P_s
Coefficiente de transferencia de calor convectivo	1	h_T
Velocidad de secado	1	k
Calor de sorción	1	L_g
Humedad de equilibrio	1	W_e
Total	15	

4.2.1 Resultados del análisis de sensibilidad mediante el método derivativo

En la Tabla 4.2 se muestran los coeficientes de sensibilidad escalados para cada uno de los parámetros. Coeficientes menores que cero implican que la variable disminuye frente a incrementos en el parámetro, mientras que los mayores que 0 implican que la variable aumenta al incrementarse el parámetro. Mientras más se alejan de cero, la sensibilidad de la variable frente al parámetro correspondiente es mayor. Por ejemplo, la humedad del grano presenta la mayor sensibilidad respecto del

área superficial del grano por unidad de volumen del mismo (a_{vp}) dado que el coeficiente de sensibilidad es de -0.4412.

Para determinar cuales son los parámetros que tienen mayor influencia en la humedad y temperatura, se comparan los valores absolutos de los coeficientes de sensibilidad.

En la Tabla 4.3 se muestran los coeficientes de sensibilidad ordenados de mayor a menor en valor absoluto para cada uno de los parámetros. Como puede verse, son 6 los parámetros que tienen coeficientes de sensibilidad superior a 0,1 en al menos una de las variables. Estos parámetros son los que se utilizarán para realizar el análisis de sensibilidad por el método de la varianza.

Tabla 4.2: Coeficientes de sensibilidad paramétrica

Parámetro	$\frac{\partial W}{\partial P_i} \frac{P_i}{W_i}$	$\frac{\partial \theta}{\partial P_i} \frac{P_i}{\theta_i}$	$\frac{\partial h}{\partial P_i} \frac{P_i}{h_i}$	$\frac{\partial T}{\partial P_i} \frac{P_i}{T_i}$
a_{vp}	-0,4412	-0,2168	0,3334	-0,3949
C_{ps}	0,0275	-0,0085	-0,0276	-0,0992
ρ	-0,2169	-0,1138	0,1656	-0,2003
ε	0,1537	0,0722	-0,1170	0,1353
ρ_a	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000
μ	0,0001	-0,0002	0,0000	-0,0001
k_{Ta}	-0,0027	0,0065	0,0018	0,0038
C_{pa}	-0,1185	0,1551	0,1175	0,3766
C_{pW}	0,0134	-0,0037	-0,0134	-0,0485
C_{pv}	-0,0037	0,0048	0,0037	0,0125
P_s	-0,0403	-0,0121	0,0524	-0,0518
h_l	-0,0041	0,0098	0,0026	0,0057
k	-0,2185	-0,1133	0,1654	-0,2003
L_g	0,0840	-0,1542	-0,0819	-0,2453
W_e	0,0748	0,0373	-0,0686	0,0784

Tabla 4.3: Coeficientes de sensibilidad paramétrica ordenados en forma descendente según valor absoluto

Parám.	$\frac{\partial W}{\partial P_i} \frac{P_i}{W_i}$	Parám.	$\frac{\partial \theta}{\partial P_i} \frac{P_i}{\theta_i}$	Parám.	$\frac{\partial h}{\partial P_i} \frac{P_i}{h_i}$	Parám.	$\frac{\partial T}{\partial P_i} \frac{P_i}{T_i}$
a_{vp}	-0,4412	a_{vp}	-0,2168	a_{vp}	0,3334	a_{vp}	-0,3949
k	-0,2185	C_{pa}	0,1551	ρ	0,1656	C_{pa}	0,3766
ρ	-0,2169	L_g	-0,1542	k	0,1654	L_g	-0,2453
ε	0,1537	ρ	-0,1138	C_{pa}	0,1175	ρ	-0,2003
C_{pa}	-0,1185	k	-0,1133	ε	-0,1170	k	-0,2003
L_g	0,0840	ε	0,0722	L_g	-0,0819	ε	0,1353
W_e	0,0748	W_e	0,0373	W_e	-0,0686	C_{ps}	-0,0992
P_s	-0,0403	P_s	-0,0121	P_s	0,0524	W_e	0,0784
C_{ps}	0,0275	h_T	0,0098	C_{ps}	-0,0276	P_s	-0,0518
C_{pw}	0,0134	C_{ps}	-0,0085	C_{pw}	-0,0134	C_{pw}	-0,0485
h_T	-0,0041	k_{Ta}	0,0065	C_{pv}	0,0037	C_{pv}	0,0125
C_{pv}	-0,0037	C_{pv}	0,0048	h_T	0,0026	h_T	0,0057
k_{Ta}	-0,0027	C_{pw}	-0,0037	k_{Ta}	0,0018	k_{Ta}	0,0038
ρ_a	0,0001	μ	-0,0002	μ	0,0000	μ	-0,0001
μ	0,0001	ρ_a	0,0000	ρ_a	0,0000	ρ_a	0,0000

4.3 Análisis de sensibilidad mediante el método de la varianza

A los efectos de analizar la validez de la hipótesis de parámetros constantes asociados con el sólido en un secadero de soja de flujo cruzado, se implementó un diseño central compuesto rotatorio (Kuehl, 2001) para aplicar el método de la varianza.

Kibar & Ozturk (2008) investigaron las propiedades físicas y mecánicas de la soja de Turquía y encontraron que la densidad, la porosidad y el diámetro dependen linealmente de la humedad. En el rango de humedad 8-16 % la variación en estas propiedades físicas es de aproximadamente el 10%. Sobre esta base, los niveles de los parámetros se eligieron de forma que la diferencia relativa entre el primer nivel y el valor central sea del 5%.

Para realizar el análisis es necesario codificar los parámetros para que los mismos tomen valores iguales. Los parámetros se codifican mediante las ecuaciones (4.1) a (4.6).

$$x_{a_{vp}} = \frac{a_{vp} - 909.091}{45.4545} \quad (4.1)$$

$$x_k = \frac{Coefk - 1}{0.05} \quad (4.2)$$

$$x_\rho = \frac{\rho - 1116.51}{55.8255} \quad (4.3)$$

$$x_\varepsilon = \frac{\varepsilon - 0.41}{0.0205} \quad (4.4)$$

$$x_{C_{pa}} = \frac{C_{pa} - 1008}{50.4} \quad (4.5)$$

$$x_{L_g} = \frac{CoefL_g - 1}{0.05} \quad (4.6)$$

Mediante esta codificación, cuando $x_i = \pm 1$ el valor del parámetro es un $\pm 5\%$ respectivamente. Notar que para ello es necesario que el denominador de las ecuaciones anteriores sea igual al 5% del valor central.

El valor de los puntos axiales para los parámetros codificados (α) fue calculado con la expresión (4.7).

$$\alpha = (2^q)^{1/4} \quad (4.7)$$

Donde q es la cantidad de parámetros utilizados en el análisis de sensibilidad. Según lo establecido en el punto 4.2.1, se realizará el análisis para 6 parámetros: área superficial del grano por unidad de volumen (a_{vp}), velocidad de secado (k), densidad del grano (ρ), porosidad del lecho (ε), calor específico del aire (C_{pa}) y calor de sorción (L_g). Tanto para la velocidad de secado como para el calor de sorción, se modifica el valor del parámetro multiplicándolo por un coeficiente: $Coefk$ y $CoefL_g$ respectivamente, esto se debe a que ambos están definidos por funciones de otras variables a diferencia de los otros parámetros que se los supone constantes a lo largo del secadero.

La cantidad de simulaciones necesarias para realizar la experiencia se calculan mediante la ecuación (4.8).

$$N = 2^q + 2q + n_r \tag{4.8}$$

El primer término representa la cantidad de combinaciones posibles cuando los parámetros codificados toman los valores de ± 1 , el segundo término son las simulaciones referidas a los valores de $\pm \alpha$ y el último término (n_r) es el número de réplicas en el valor central que son 3: Cuando todos los parámetros codificados valen 0, y cuando valen ± 0.002 (que implican variaciones del $\pm 0.01\%$ en los parámetros sin codificar). De esta manera, se requieren 79 simulaciones. En el Anexo II se muestran los datos obtenidos en las simulaciones realizadas.

Los valores obtenidos del análisis ANOVA para cada una de las repuestas, humedad y temperatura del grano, humedad y temperatura del aire, se presentan en las Tablas 4.4, 4.5, 4.6, 4.7 respectivamente.

Tabla 4.4: ANOVA para la humedad del grano

Parámetro	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F-ratio	Valor p
a_{vp}	0,00081353	1	0,00081353	26557,7	0,0000
k	0,00019989	1	0,00019989	6525,41	0,0000
ρ	0,00019062	1	0,00019062	6222,92	0,0000
ε	0,00009684	1	0,00009684	3161,43	0,0000
C_{pa}	0,00005927	1	0,00005927	1934,88	0,0000
L_g	0,00002965	1	0,00002965	967,78	0,0000
Error total	0,00000221	72	0,00000003		

Tabla 4.5: ANOVA para la temperatura del grano

Parámetro	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F-ratio	Valor p
a_{vp}	31,8497	1	31,8497	11876,51	0,0000
k	8,66531	1	8,66531	3231,23	0,0000
ρ	8,81622	1	8,81622	3287,5	0,0000
ε	3,53045	1	3,53045	1316,48	0,0000
C_{pa}	16,4581	1	16,4581	6137,09	0,0000
L_g	16,1319	1	16,1319	6015,44	0,0000
Error total	0,193085	72	0,00268174		

Tabla 4.6: ANOVA para la humedad del aire

Parámetro	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F-ratio	Valor p
a_{vp}	0,00000883	1	0,00000883	6051,33	0,0000
k	0,00000209	1	0,00000209	1436,08	0,0000
ρ	0,00000209	1	0,00000209	1436,08	0,0000
ε	0,00000095	1	0,00000095	648,16	0,0000
C_{pa}	0,00000101	1	0,00000101	691	0,0000
L_g	0,00000044	1	0,00000044	301,47	0,0000
Error total	1,05E-07	72	1,46E-09		

Tabla 4.7: ANOVA para la Temperatura del aire

Parámetro	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F-ratio	Valor p
a_{vp}	50,0883	1	50,0883	23515,27	0
k	12,8858	1	12,8858	6049,59	0
ρ	12,9019	1	12,9019	6057,13	0
ε	5,8829	1	5,8829	2761,89	0
C_{pa}	45,9659	1	45,9659	21579,92	0
L_g	19,3746	1	19,3746	9095,91	0
Error total	0,153362	72	0,00213003		

Una representación de las tablas ANOVA son los gráficos Pareto, en los que las barras representan los efectos estandarizados de cada parámetro estudiado. La línea vertical, tiene correlación con el valor p de la tabla de ANOVA. Aquellas barras que sobrepasan la línea se corresponden con valores del estadístico p inferior al 5%, es decir son los parámetros que tienen efecto estadísticamente significativo sobre la humedad o temperatura. Además estos gráficos dan una idea de cómo es la influencia del parámetro sobre la respuesta. En las figuras 4.1 a 4.4 se muestran los gráficos de Pareto para cada una de las variables analizadas.

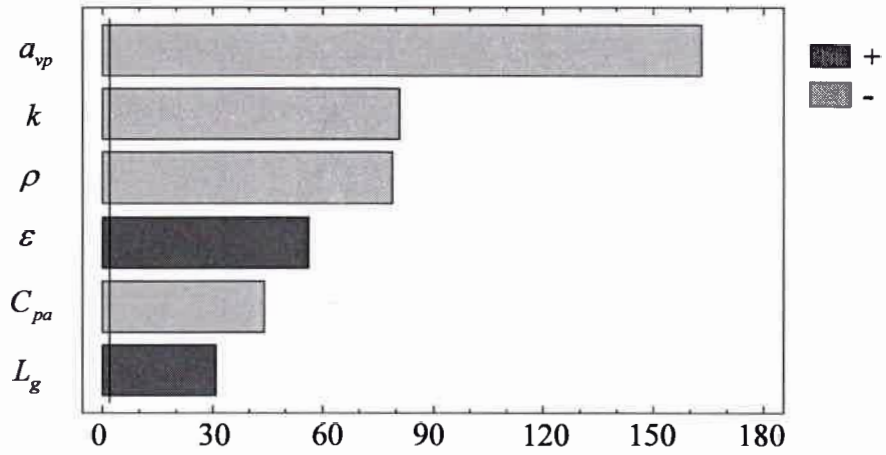


Figura 4.1: Gráfico de Pareto estandarizado para la humedad del grano

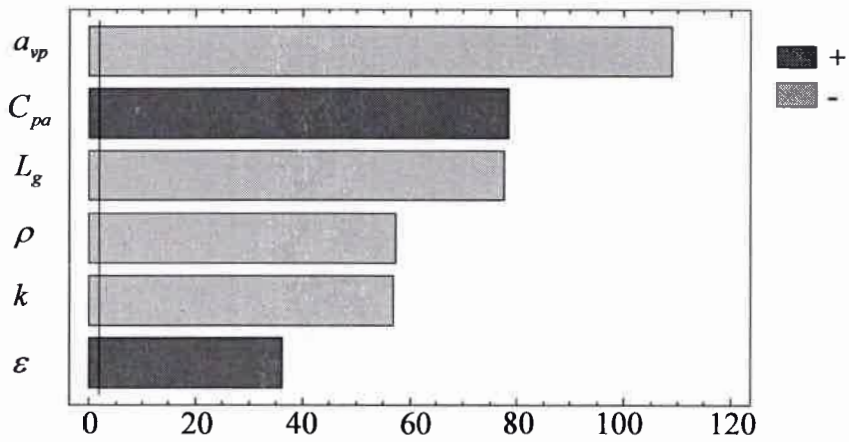


Figura 4.2: Gráfico de Pareto estandarizado para la temperatura del grano

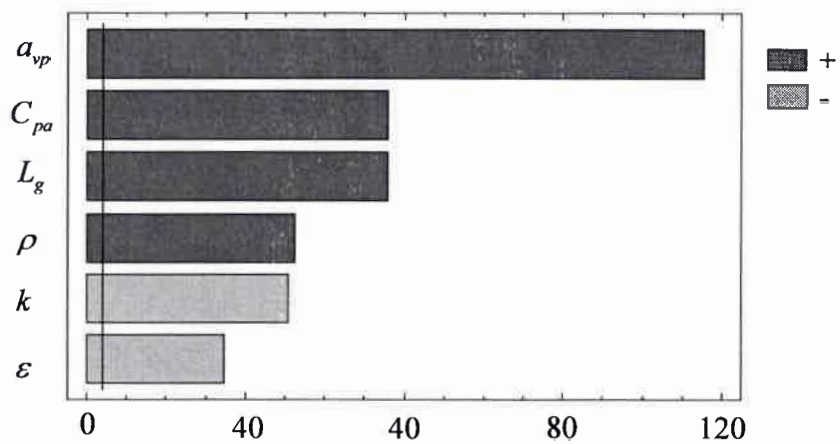


Figura 4.3: Gráfico de Pareto estandarizado para la humedad del aire

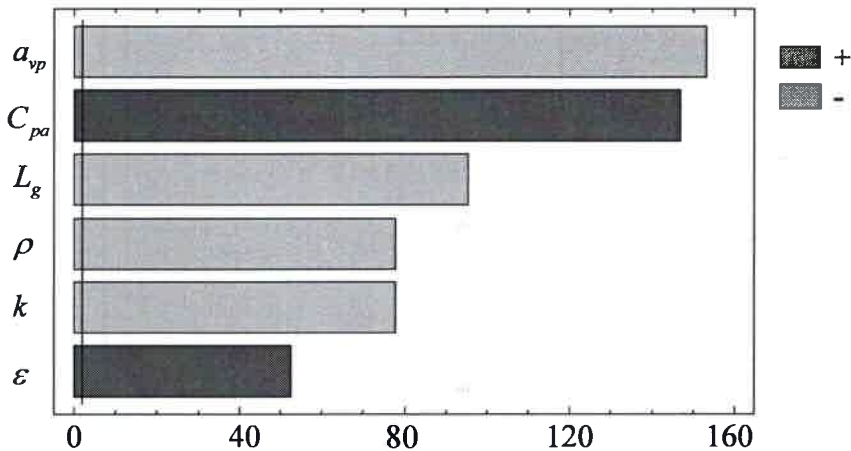


Figura 4.4: Gráfico de Pareto estandarizado para la temperatura del aire

El p valor, que se presenta en las tablas y se visualiza en los gráficos de Pareto, para cada uno de los parámetros considerados, indica que todos son estadísticamente significativos. Se confirman así las conclusiones cualitativas obtenidas a partir del método derivativo acerca de la influencia de estos parámetros.

4.4 Análisis de la influencia de los parámetros

4.4.1 Análisis del parámetro a_{vp} y de k

El parámetro a_{vp} participa en forma explícita en las ecuaciones de variación de la temperatura del grano y del aire (ecuaciones (2.77) y (2.78)). No obstante, al ser n_w función del cuadrado de a_{vp} se tiene que las ecuaciones de variación de la humedad también dependen de a_{vp} . Por otro lado, n_w aumenta al aumentar k .

Si se analiza la ecuación de variación de la humedad del grano, se puede ver que cuanto mayor es la transferencia de humedad desde el grano hacia el aire (n_w), mayor será en valor absoluto la variación de la humedad del grano en el tiempo. Dado que el signo que acompaña a n_w es negativo, es lógico esperar que para un tiempo de secado fijo se alcancen menores humedades finales si se incrementa el valor de a_{vp} o el de k .

Lo anterior explica que $\frac{\partial W}{\partial a_{vp}} < 0$ y $\frac{\partial W}{\partial k} < 0$.

Por el contrario, para la ecuación de variación de la humedad del aire se tiene que el término n_w tiene influencia positiva por lo que un incremento en el parámetro

a_{vp} o en k implica un aumento en la variación de la humedad del aire explicando que

$$\frac{\partial h}{\partial a_{vp}} > 0 \text{ y } \frac{\partial h}{\partial k} > 0.$$

Por otro lado, como se mencionó en el análisis de las ecuaciones de variación de las temperaturas, existen dos flujos de energía; uno convectivo debido a las diferencias de temperaturas entre el aire y el grano y otro debido a la energía involucrada en la transferencia de materia (calor latente de vaporización). Al aumentar a_{vp} o k , aumenta n_w , haciendo que el gasto energético para evaporar agua sea mayor, por lo que las temperaturas finales del grano y del aire serán menores justificando que

$$\frac{\partial \theta}{\partial a_{vp}} < 0, \frac{\partial T}{\partial a_{vp}} < 0, \frac{\partial \theta}{\partial k} < 0 \text{ y } \frac{\partial T}{\partial k} < 0.$$

4.4.2 Análisis de los parámetros ρ y ε

Se decide analizar juntos estos parámetros ya que se pueden agrupar en un término tanto en los balances para el grano como en los balances para el aire.

En los balances para el grano (Ecuaciones (2.75) y (2.77)): $\frac{1}{\rho(1-\varepsilon)}$

En los balances para el aire (Ecuaciones (2.76) y (2.78)) : $\rho \left(\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \right)$ que se puede reordenar a $\rho \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1 \right)$

Analizando estos términos, se puede ver que una disminución de ρ debería provocar cambios en las variables de estado en la misma dirección que incrementos de ε .

Cuando disminuye la densidad del grano o aumenta la porosidad, se incrementa el término $\frac{1}{\rho(1-\varepsilon)}$ y considerando el caso más común de que $\frac{\partial W}{\partial y} < 0$, el término de transferencia de agua debida al flujo de granos aumenta lo que implica que la variación de la humedad sea más lenta por lo que la humedad final del grano será mayor. Es decir, $\frac{\partial W}{\partial \rho} < 0$ y $\frac{\partial W}{\partial \varepsilon} > 0$.

Dado que la humedad final del grano es mayor, el aire tendrá una humedad final menor por lo que los cambios en esta variable tienen sentido contrario a los que se producen en la humedad del grano. Es por ello que $\frac{\partial h}{\partial \rho} > 0$ y $\frac{\partial h}{\partial \varepsilon} < 0$.

Debido a que se transfiere una menor cantidad de agua cuando disminuye la densidad del grano o con un incremento en la porosidad, el grano entrega menos energía en agua evaporada almacenando la misma en forma térmica. Es decir, el grano aumenta su temperatura. Con esto se puede ver que $\frac{\partial \theta}{\partial \rho} < 0$ y $\frac{\partial \theta}{\partial \varepsilon} > 0$. Consecuentemente, el aire aporta menor cantidad de energía para la evaporación por lo que sufre un enfriamiento menor. Es decir, $\frac{\partial T}{\partial \rho} < 0$ y $\frac{\partial T}{\partial \varepsilon} > 0$.

4.4.3 Análisis del parámetro C_{pa}

El parámetro C_{pa} participa en forma explícita en la ecuación de variación de la temperatura del aire (Ecuación (2.78)). No obstante también está incluido dentro del coeficiente de transferencia de calor convectivo (Ecuación (2.43)), el cual depende de $C_{pa}^{1/3}$. Analizando la ecuación de variación de la temperatura del aire se puede ver que si se incrementa el valor de C_{pa} , aumenta tanto el numerador como el denominador del término de transferencia de calor convectivo. No obstante el denominador es proporcional a C_{pa} mientras que el denominador es proporcional a $C_{pa}^{1/3}$ por lo que el término de transferencia convectiva es proporcional a $C_{pa}^{-2/3}$. Esto implica que un incremento en el calor específico del aire, disminuye el segundo término involucrado en la ecuación de variación de la temperatura del aire por lo que el aire puede entregar mayor cantidad de energía con un salto térmico menor. Por lo que al aumentar el C_{pa} , aumenta la temperatura final del aire. Esto implica que $\frac{\partial T}{\partial C_{pa}} > 0$.

En la ecuación de variación de la temperatura del grano (Ecuación (3.15)), la variación en el C_{pa} influye en el coeficiente de transferencia de calor convectivo (Ecuación (2.43)) y además al haberse incrementado la temperatura del aire, existe un mayor gradiente de temperatura. De esta manera, el grano tiene mayor energía

disponible para evaporar agua y además alcanza una temperatura mayor. Esto explica

$$\text{que } \frac{\partial W}{\partial C_{pa}} < 0 \text{ y } \frac{\partial \theta}{\partial C_{pa}} > 0.$$

Por último, al haberse evaporado mayor cantidad de agua cuando se incrementa el valor de C_{pa} , la humedad absoluta del aire también aumenta por lo que $\frac{\partial h}{\partial C_{pa}} > 0$.

4.4.4 Análisis del parámetro L_g

Este parámetro aparece explícitamente sólo en la ecuación de variación de la temperatura del grano (Ecuación (2.77)). En la misma puede verse que si este valor se incrementa, el cambio en el tiempo de la temperatura del grano disminuye. Dado que el tiempo de contacto entre el grano y el aire no se modifica, la temperatura que alcanza el grano es menor. Es decir, $\frac{\partial \theta}{\partial L_g} < 0$. Dicho de otra manera se requiere un mayor consumo energético para la evaporación del agua con lo que la energía térmica disminuye. Dado que el aire aporta mayor energía, la temperatura que éste alcanzará será menor por lo que $\frac{\partial T}{\partial L_g} < 0$.

La velocidad de secado del grano (Ecuación (2.79)) depende de la temperatura del aire, y por lo visto al aumentar L_g , disminuye la temperatura y consecuentemente se tiene una velocidad de secado inferior. Esto implica que el grano se estará secando menos, o lo que es lo mismo, saldrá del secadero con una humedad mayor. Con esto se puede ver que $\frac{\partial W}{\partial L_g} > 0$. Además como el aire recibe menos humedad, $\frac{\partial h}{\partial L_g} < 0$.

4.5 Conclusiones

Estos resultados indican que para mejorar las predicciones del modelo el valor de los seis parámetros, ε , ρ , a_{vp} , C_{pa} , k y L_g encontrados como relevantes en lo que respecta a la sensibilidad del modelo debe ser tenido especialmente en cuenta, ya sea a través de la introducción de ecuaciones que incluyan su variación en el secadero en lugar de usar valores constantes así como determinar sus valores con la mayor precisión posible.

CAPÍTULO 5: RESULTADOS DE ESTADO
ESTACIONARIO

5.1 Introducción

A partir del simulador desarrollado, se puede analizar el comportamiento de un determinado secadero de flujo cruzado en estado estacionario.

En el presente capítulo se obtienen los perfiles de humedad y temperatura dentro del secadero, y a efectos de analizar el comportamiento del sistema, se realizan simulaciones frente a distintas condiciones ambientales, condiciones del aire de secado y flujos de grano.

5.2 Perfiles de humedad y temperatura dentro del secadero en estado estacionario

Las dimensiones del equipo, flujos de grano y aire, condiciones iniciales y de borde utilizadas en las simulaciones realizadas en la presente sección son las detalladas en el apartado 2.7.

En las Figuras 5.1 a 5.4 se muestran los perfiles de estado estacionario para la humedad y temperatura del grano, humedad y temperatura del aire respectivamente. El tamaño de malla usado en la resolución numérica es de 35×15 . En estas figuras se indican los valores de las variables en diferentes puntos de interés: en la entrada y salida del grano, en la entrada y salida del aire y al medio del secadero, o sea que se consideran tres puntos para cada una de las variables: los extremos (entrada y salida) y el centro del secadero. Las coordenadas usadas en esta figura son $x(0 \rightarrow L_x)$ en la dirección del aire, $y(0 \rightarrow L_y)$ en la dirección del sólido y el eje restante indica la variable que se considera, W , h_a , T , θ , en las Figuras 5.1 a 5.4 respectivamente.

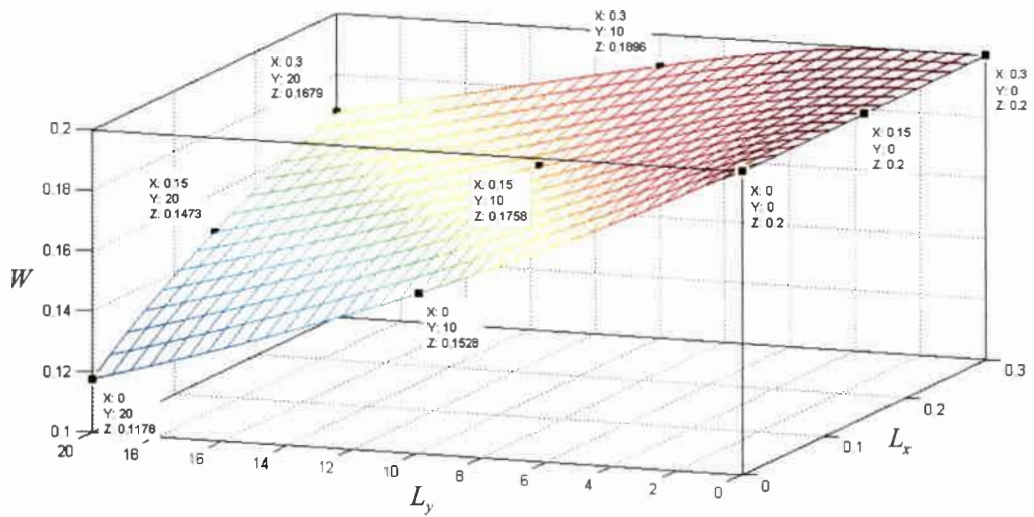


Figura 5.1. Perfil de humedad del grano en estado estacionario

La humedad del sólido disminuye en la dirección y mientras que aumenta en la dirección x . Esto se debe a que el grano para valores bajos de x se encuentra con aire con bajo contenido de humedad por lo que existe una mayor fuerza impulsora para la transferencia de materia.

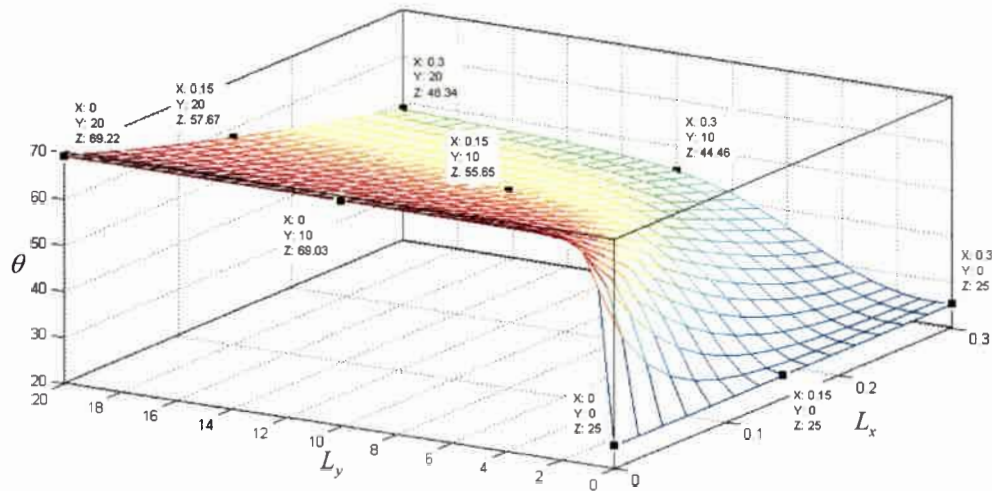


Figura 5.2. Perfil de temperatura del grano en estado estacionario

La temperatura del grano aumenta en la medida en que la energía del aire no se use para el secado, y por lo tanto queda disponible para calentar al grano. Así, en los sectores en que la velocidad de secado es menor, mayor es la temperatura del grano.

Como límite la temperatura del sólido alcanza a la del aire, si no hay secado, lo cual sucede para estas condiciones a la salida del grano y entrada del aire ($x=0$, $y=L_y$)

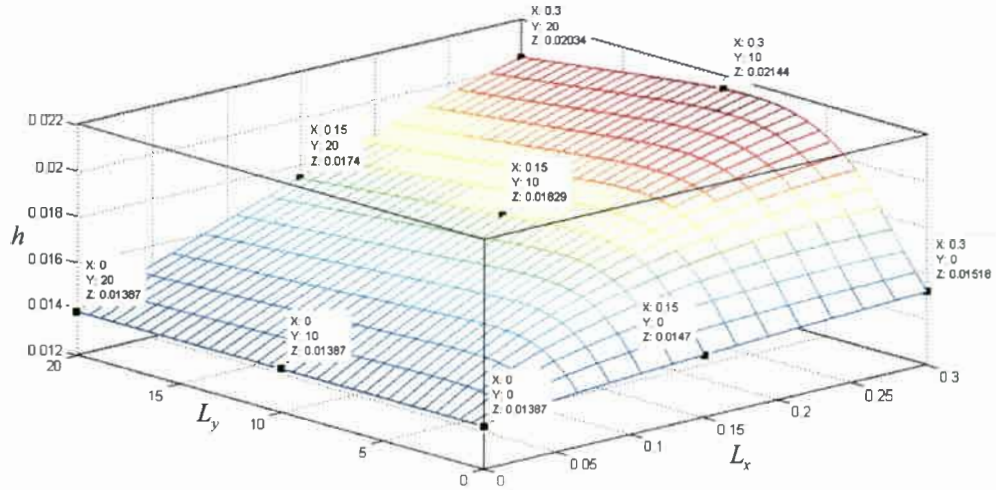


Figura 5.3. Perfil de humedad del aire en estado estacionario

El mayor cambio de humedad del aire se observa en la dirección x , esto se debe a que el aire fluye en esa dirección por lo que en $x=0$ se tiene la humedad de entrada del aire y conforme éste avanza se humedece.

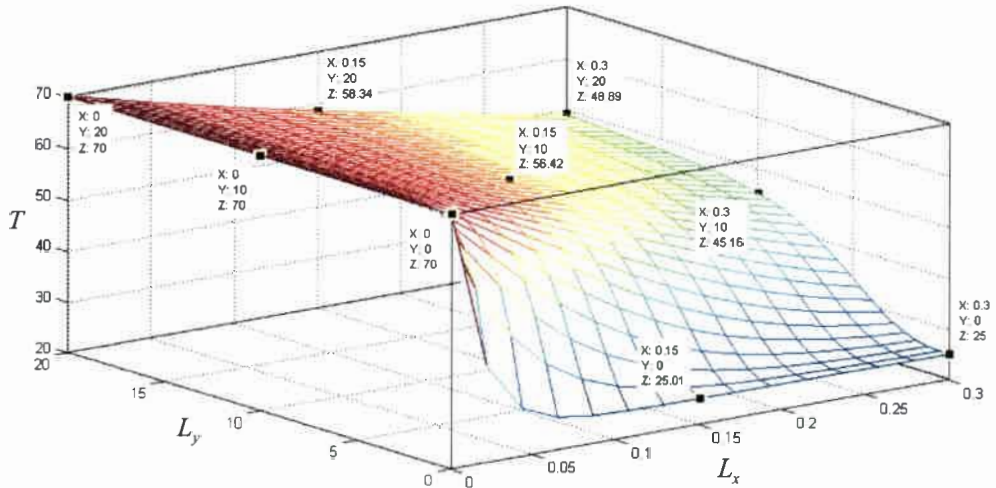


Figura 5.4. Perfil de temperatura del aire en estado estacionario

La otra función del aire en el secadero es la de proveer la energía necesaria para el secado, cediendo su calor sensible, con su consecuente enfriamiento. Por ello su

temperatura disminuye en la dirección x , desde que entra hasta que sale del secadero. Con respecto a las variaciones en la dirección y , a la entrada del sólido la velocidad de secado es mayor al ser mayor la fuerza impulsora (mayor humedad del sólido), por lo tanto para cualquier valor de x la temperatura del aire aumenta al aumentar y .

Como es de esperar, la primera capa de granos en dirección vertical ($L_x = 0$), se seca más que cualquiera de las otras capas. A modo de ejemplo, notar que la humedad del grano en dicha capa, al medio del secadero en la dirección de flujo del sólido ($L_y = 10m$) es de 0,1528, mientras que en la capa del medio ($L_x = 0,15m$) en igual posición y , la humedad es de 0,1758 (Figura 5.1). Esto se debe a que la velocidad de secado en la primera capa es mayor debido que el grano entra en contacto con el aire que entra al secadero, que es el que tiene mayor temperatura y menor humedad como se puede ver en las Figuras 5.3 y 5.4.

5.3 Variación de la humedad final del grano con las condiciones ambientales

El valor de la humedad absoluta del aire que entra al secadero depende de la temperatura y de la humedad relativa ambiente. Si aumenta la temperatura ambiente sin modificarse la humedad relativa o si aumenta la humedad relativa sin modificarse la temperatura, aumenta la humedad absoluta del aire de secado. Al aumentar la humedad absoluta de entrada del aire, existe una menor fuerza impulsora para la transferencia de masa y consecuentemente el grano sale más húmedo.

El valor de humedad absoluta calculado con las condiciones ambientales, se utiliza como condición inicial sólo para determinar el estado estacionario de referencia y como condición de borde en todos los casos de simulación, mientras que en las simulaciones dinámicas la condición inicial es determinada por el estado en que se encuentra el sistema en el momento en que se produce una perturbación.

En la Figura 5.5 se muestra la humedad de salida promedio de los granos en función de la temperatura ambiente, mediante curvas paramétricas en la humedad relativa ambiente. Se observa mayor influencia de la temperatura cuando ésta aumenta y dicha influencia se incrementa a mayores humedades relativas.

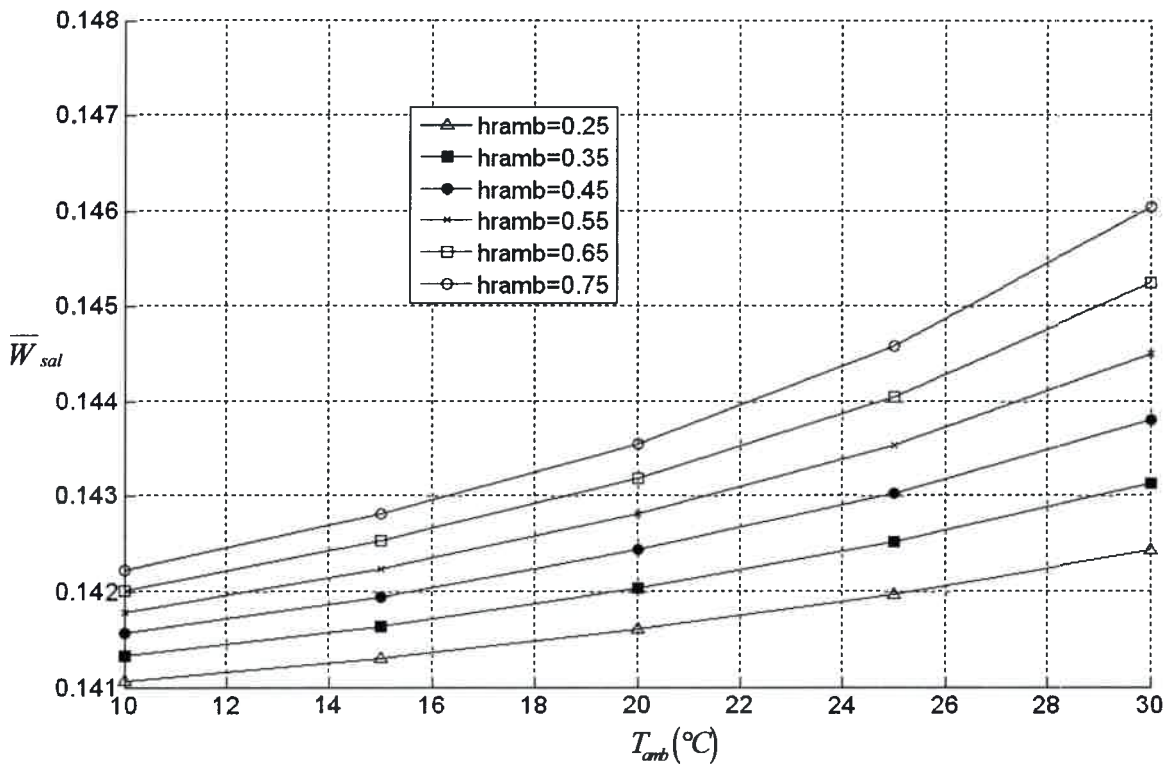


Figura 5.5. Humedad final del grano a la salida del secadero en función de la temperatura ambiente, para distintos valores de la humedad relativa ambiente

En la Figura 5.6 se muestran curvas paramétricas, respecto de la temperatura ambiente, de la humedad de salida promedio del sólido en función de la humedad relativa ambiente. En la misma, puede verse que la humedad del sólido a la salida presenta un comportamiento lineal frente a la humedad relativa ambiental para todas las temperaturas del aire en el rango analizado. Las pendientes de estas rectas se incrementan con la temperatura ambiente.

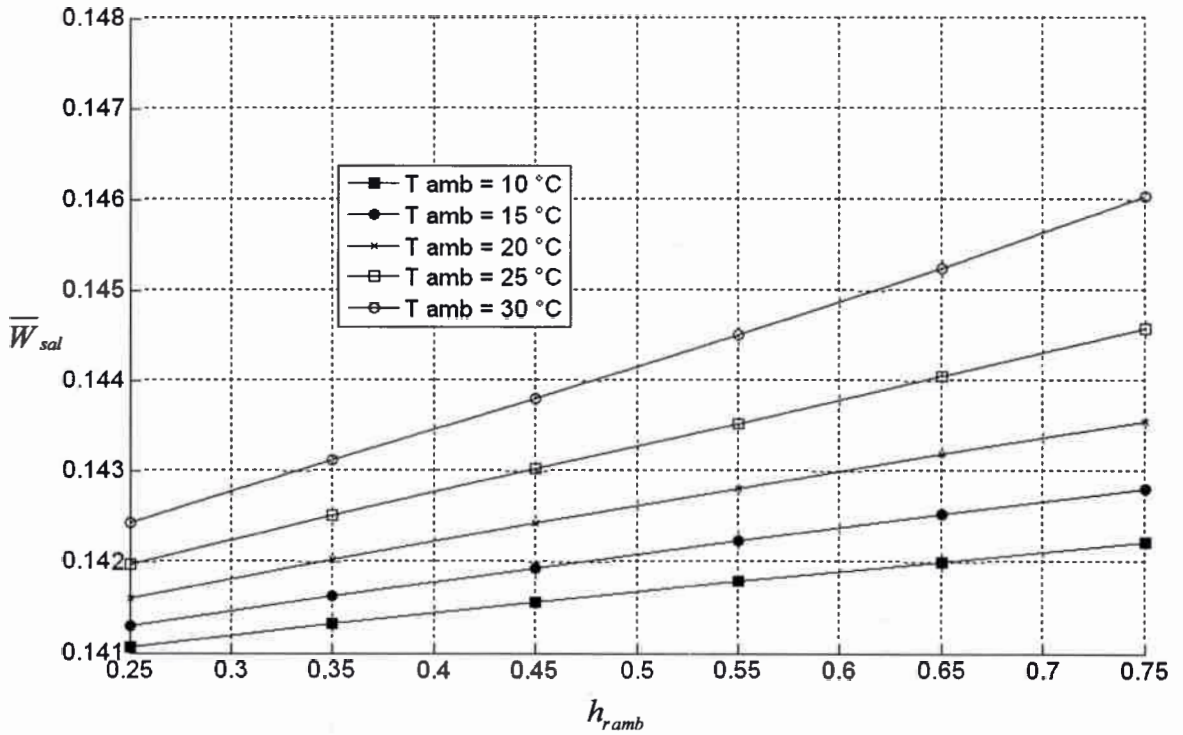


Figura 5.6. Humedad media final del grano a la salida del secadero en función de la humedad relativa ambiente para distintos valores de la temperatura ambiente

5.4 Variación de la humedad final del grano con las variables operativas del aire

En la Figura 5.7 se muestran curvas paramétricas, respecto de la temperatura del aire de secado, de la humedad de salida promedio del sólido en función del flujo de aire de secado. Para bajos flujos de aire de secado, se observa que la influencia de esta variable es mayor que a flujos altos. Es decir, si el caudal de aire es bajo y se lo incrementa en una cantidad pequeña, se notarán mayores cambios en la humedad de salida que si se aplica el mismo incremento a caudales mayores. Esto se debe a que al renovarse el aire dentro del secadero con mayor velocidad, la humedad que éste alcanza dentro del secadero será menor y consecuentemente tiene mayor capacidad de secado. Por otro lado, el coeficiente de transferencia de calor convectivo es proporcional a $G_a^{0.35}$ por lo que un aumento en el caudal de aire mejora la transferencia de energía calentándose el grano con mayor velocidad llevando a que este tenga una humedad de equilibrio menor y consecuentemente exista mayor fuerza impulsora para la transferencia de materia. No obstante, cuando el flujo de aire es muy alto, se alcanza

el equilibrio térmico rápidamente anulando el término convectivo, de esta manera un incremento en el coeficiente de transferencia de calor no incide demasiado en la humedad del final del grano. En este caso la limitante es la velocidad de transferencia de masa.

En la Figura 5.8 se muestran curvas paramétricas, respecto del flujo de aire de secado, de la humedad de salida promedio del sólido en función de la temperatura del aire de secado. Al aumentar la temperatura del aire de secado se tiene una mayor fuerza impulsora para la transferencia de energía que implica que el grano alcanzará temperaturas mayores, disminuirá la humedad de equilibrio y se podrá secar más el grano. A diferencia del caso anterior, el término convectivo no se anula al aumentar la temperatura del aire dado que éste depende linealmente de la diferencia de temperaturas del aire y el grano. Esta dependencia explica que las curvas tiendan a semejarse a una recta.

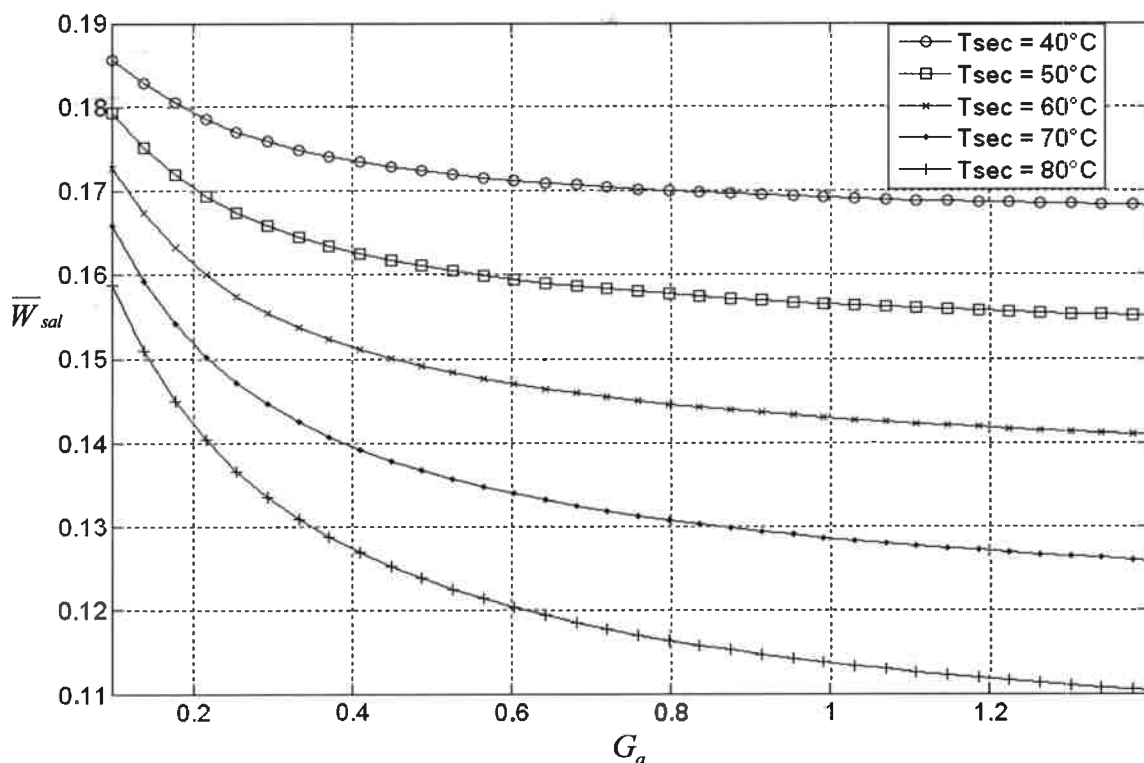


Figura 5.7. Humedad media final del grano a la salida del secadero en función del flujo de aire de secado a diferentes temperaturas del aire de secado.

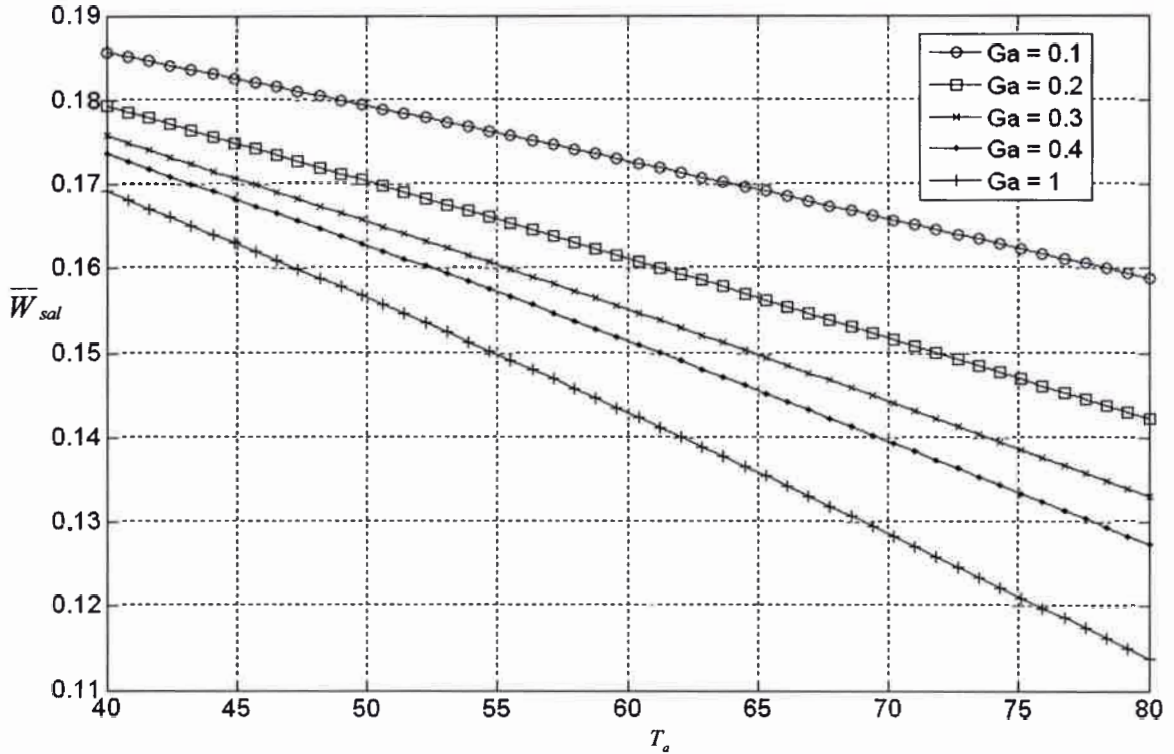


Figura 5.8. Humedad media final del grano a la salida del secadero en función de la temperatura del aire de secado para varios flujos de aire.

5.5 Variación de la humedad final del grano con el flujo del grano

En la Figura 5.9 se muestra la humedad final promedio del grano a la salida del secadero en función del flujo de granos. Cuando el flujo de granos es muy bajo, el tiempo de residencia dentro del secadero es alto lo que implica mayor tiempo de secado. Consecuentemente el grano puede alcanzar la humedad mínima para las condiciones de secado imperantes. Cuando el flujo de granos aumenta, disminuye el tiempo de secado y el grano se seca menos. Es de esperar que la curva sea asintótica a la humedad de entrada cuando el flujo de granos aumenta, esto se debe a que en el límite, el tiempo de residencia sería nulo y no existiría transferencia de masa y energía entre el aire y el grano.

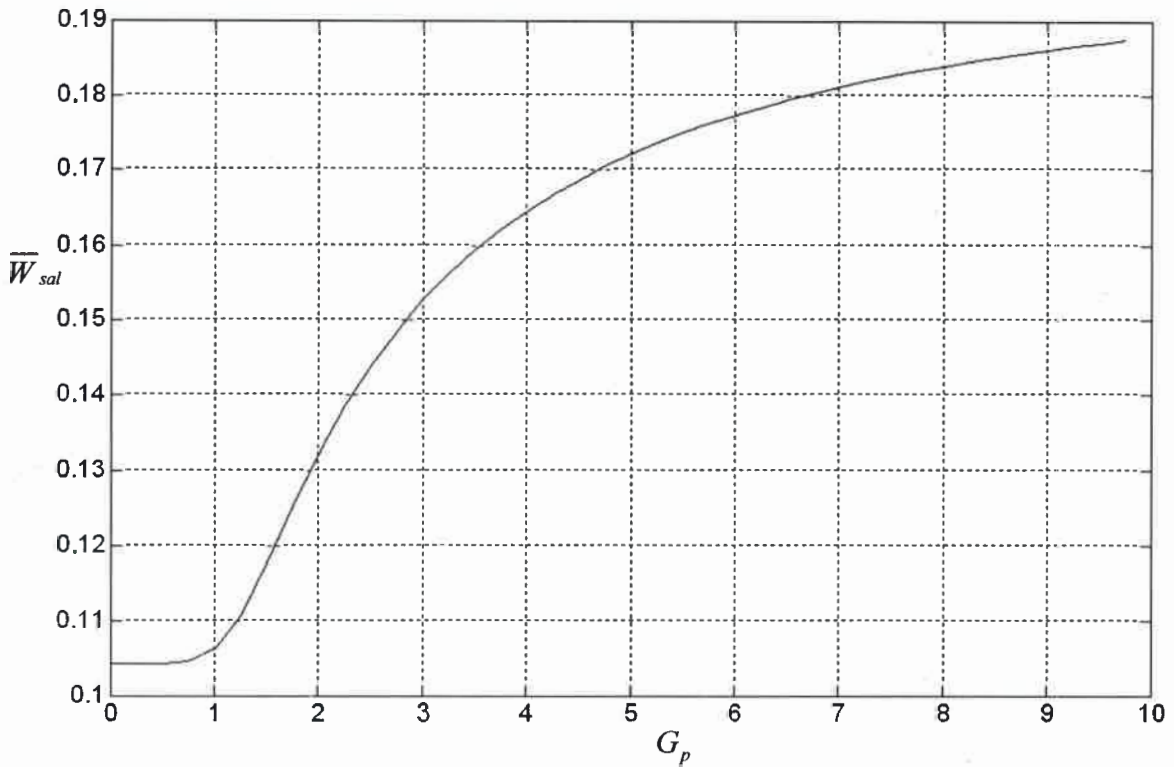


Figura 5.9. Humedad media final del grano a la salida del secadero en función del flujo de granos

5.6 Conclusiones

El simulador desarrollado permite predecir los perfiles de humedad y temperatura tanto del grano como del aire, incluyendo los valores a la salida del secadero, una vez que se alcanzó el estado estacionario. Además es posible predecir el comportamiento del secadero en estado estacionario a distintos valores de las variables operativas y parámetros. Esto puede utilizarse en la predicción de la producción de un dado secadero así como en el diseño de un secadero para lograr una producción especificada, teniendo en cuenta todas las variables que influyen en el sistema.

CAPÍTULO 6: SIMULACIÓN DINÁMICA

6.1 Introducción

En esta sección se realizan simulaciones dinámicas para analizar la influencia de las perturbaciones de las variables operativas sobre la humedad de salida del grano (variable de interés) en estado transitorio. Para ello, partiendo del estado estacionario obtenido en la sección 5.2, se excita el sistema mediante distintas perturbaciones en las variables involucradas en el proceso. Para observar en los gráficos el momento en que se produce la perturbación, se grafica el estado estacionario inicial desde el tiempo 0 hasta los 750 segundos, momento en que se produce el cambio en la variable correspondiente.

Para resolver el sistema de ecuaciones diferenciales que definen el modelo y obtener la respuesta dinámica se analizan 2 alternativas, en ambos casos utilizando la función `ode15s` (como se vio en la sección 3.3):

Una de las alternativas es realizar la simulación para un tiempo total lo suficientemente largo como para que el sistema alcance el estado estacionario. Por ejemplo, si se introduce un escalón en la humedad de entrada del grano, el sistema evolucionará hacia un nuevo estado estacionario en un tiempo determinado por lo que el tiempo total de simulación debería ser mayor para asegurar que el sistema no cambiará más en el tiempo hasta que se produzca un nuevo cambio.

La otra alternativa, es dividir el tiempo total en períodos de tiempo cortos y realizar la simulación para cada período utilizando los resultados de cada uno de ellos como condición inicial del siguiente.

La primera alternativa tiene la ventaja de que requiere menos tiempo de cálculo. Esto se debe a que cuando se resuelve por períodos, la cantidad de ecuaciones a resolver queda multiplicada por la cantidad de períodos en que se dividió el tiempo total de simulación. Es decir, para cada período es necesario resolver la misma cantidad de ecuaciones que para el tiempo total de simulación.

No obstante, el primer método no permite tener resultados parciales ya que resuelve las ecuaciones para el total del tiempo de simulación. La segunda alternativa permitiría introducir algún otro cambio luego de transcurrido cada período. Por lo que la segunda alternativa permitiría utilizar los resultados parciales para la implementación de algoritmos de control, en donde podría requerirse modificar, además de las condiciones iniciales, las condiciones de borde (como por ejemplo flujo

de granos, o temperatura del aire de secado). Dado que se está desarrollando un simulador para utilizar en configuraciones de control, es necesario utilizar la segunda alternativa propuesta para realizar las simulaciones dinámicas. De esta manera, en cada período de simulación se podrá introducir una acción de control. El período de tiempo seleccionado es de 5 minutos, es decir 300 segundos. Este tiempo debe ser un orden de magnitud inferior al tiempo de residencia del grano en el equipo (Whitfield, 1988).

Para comparar los tiempos de establecimiento (tiempo requerido para alcanzar el nuevo estado estacionario), se utiliza como referencia el tiempo de residencia del grano dentro del secadero, que se calcula mediante la expresión (6.1) .

$$t_r = \frac{L_y \rho (1 - \varepsilon)}{G_p} \quad (6.1)$$

Para las condiciones fijadas como caso de estudio (sección 2.7) el tiempo de residencia es de 5270 segundos. Como puede verse, el período de 300 segundos cumple con el requisito de ser un orden de magnitud menor que el tiempo de residencia.

6.2 Respuesta dinámica frente a diferentes perturbaciones sin lazo de control

En un secadero continuo es normal que el contenido de humedad de los granos con que se alimenta el equipo, tenga variaciones de entre el 10 y el 15% (Moreira, 1992). En función de esto, las simulaciones dinámicas que se realizan en la presente sección contemplan perturbaciones del tipo escalón del 15%, en la humedad de entrada del grano y para obtener resultados comparables se aplica el mismo porcentaje al resto de las variables que se perturban. Se analiza también la respuesta frente a cambios aleatorios en la humedad de entrada del grano.

En las figuras presentadas, se marcan el tiempo (segundos) y el valor de la variable correspondiente, para los puntos de interés: tiempo en que se introduce la perturbación, demora hasta que se empieza a observar cambios a la salida (tiempo muerto), tiempo de establecimiento y tiempos en que se alcanzan los valores máximos y mínimos de la respuesta.

6.2.1 Perturbaciones en la humedad de entrada del grano

En la Figura 6.1 se observa la respuesta dinámica del sistema frente a un cambio escalón de +15% en la entrada de la humedad del grano, es decir, el grano alimentado al secadero pasa de tener una humedad de 0,2 a 0,23. En la Figura 6.2 se perturba el sistema mediante un escalón de -15% en la entrada llevando la humedad de alimentación del grano de 0,2 a 0,17.

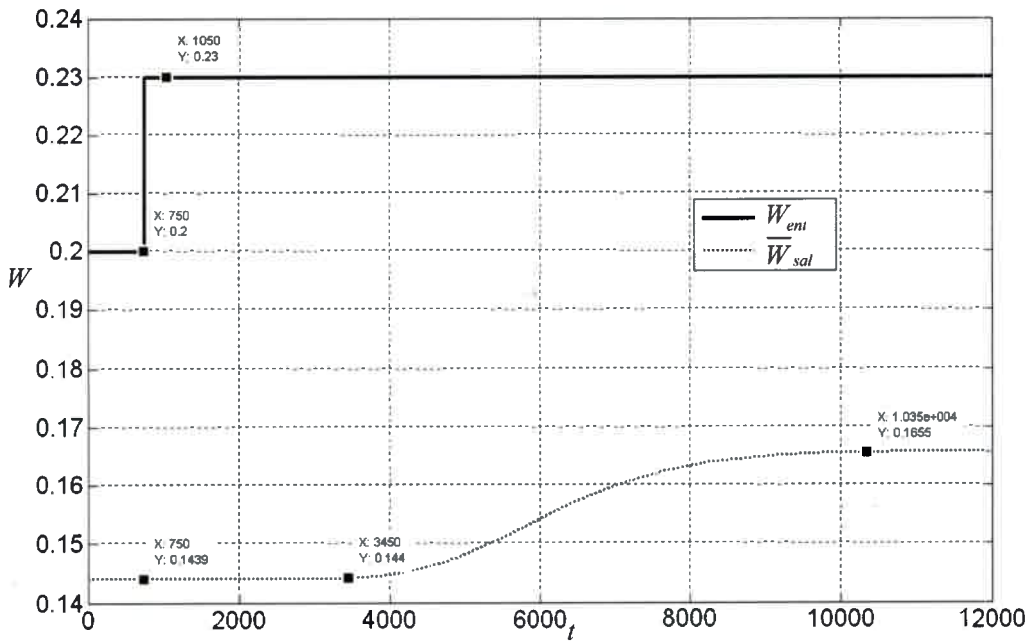


Figura 6.1. Respuesta dinámica del sistema frente a un cambio escalón de +15% en la humedad de entrada del grano.

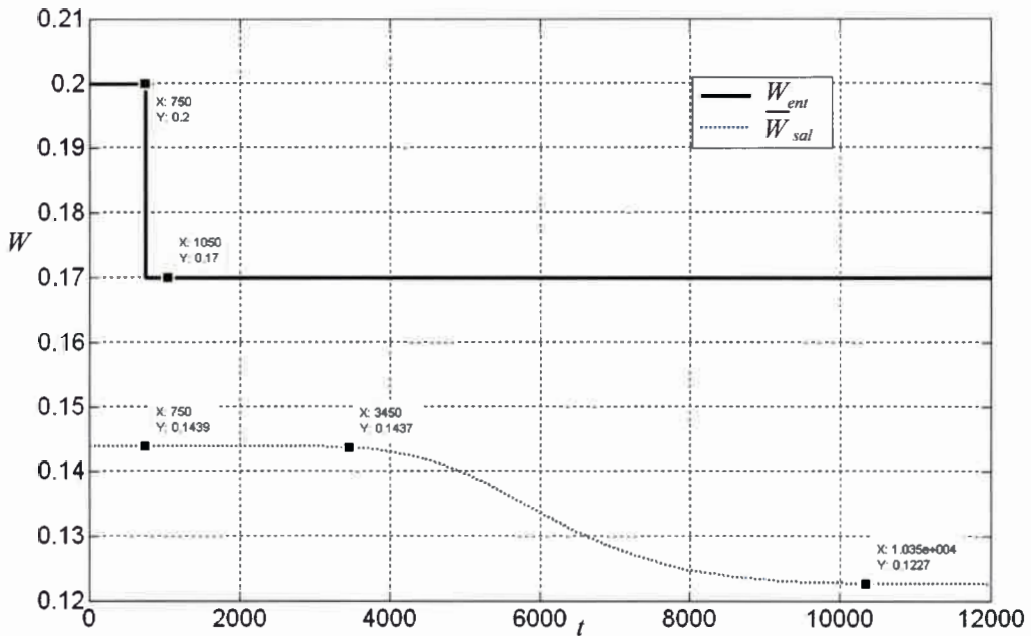


Figura 6.2. Respuesta dinámica del sistema frente a un cambio escalón de -15% en la humedad de entrada del grano.

Al variar la humedad de entrada del grano, el sistema alcanza un nuevo estado estacionario, lo que indica que el sistema es estable. Dado que no se modifican las condiciones de secado ni el tiempo de residencia, la humedad de salida aumenta al aumentar la de entrada y disminuye al disminuir la misma. El cambio observado en la salida es de igual magnitud al aplicado en la entrada, en este caso del $\pm 15\%$ según sea el cambio en la entrada. Esta relación se mantiene para otras amplitudes de escalón en la humedad de entrada tal como se muestra en la Tabla 6.1.

En ambos casos se observa que la humedad de salida comienza a variar 2700 segundos después del cambio en la entrada que representa aproximadamente la mitad del tiempo de residencia y alcanza el nuevo estado estacionario aproximadamente en 7000 segundos después de que se comienzan a observar cambios en la salida.

Tabla 6.1. Cambios producidos en la humedad de salida a partir de cambios escalón en la humedad de entrada

W_{in1}	\bar{W}_{sal1}	Amplitud del escalón de entrada	W_{in2}	\bar{W}_{sal2}	Amplitud del escalón de salida obtenido
0,2	0,1439	20%	0,24	0,1729	20%
0,2	0,1439	-20%	0,16	0,1156	-20%
0,2	0,1439	15%	0,23	0,1655	15%
0,2	0,1439	-15%	0,17	0,1227	-15%
0,2	0,1439	10%	0,22	0,1583	10%
0,2	0,1439	-10%	0,18	0,1296	-10%

En la figura 6.3 se muestra la respuesta dinámica del secadero frente a una onda cuadrada en la humedad de entrada del grano que varía entre 0,17 y 0,23 con un período de 6000 segundos. Esta onda, es equivalente a producir cambios escalones positivos y negativos cada 6000 segundos. Por lo analizado para el cambio escalón en la humedad de entrada, se esperaría que la humedad del grano a la salida oscile entre valores de 0.1227 y 0.1655. No obstante, como se puede ver en la figura 6.3, la humedad de salida oscila continuamente entre valores de 0.1339 y 0.1541, es decir con una amplitud menor a la esperada. Esto se debe a que la frecuencia de la onda de entrada es demasiado rápida como para que el sistema alcance el estado estacionario esperado (calculado con el cambio escalón) entre un escalón y el siguiente. Por esta razón, la amplitud de la salida será función de la amplitud y frecuencia de la onda de entrada. Por otro lado, se observa que el período de la onda de salida es igual a la de entrada, en este caso 6000 segundos.

En la Figura 6.4, se presentan los resultados para una humedad de entrada aleatoria (entre 0,17 y 0,23). Las humedades de salida mínima y máxima que se pueden alcanzar corresponden a los valores de estado estacionario para una humedad de entrada de 0,17 y 0,23 respectivamente. No obstante estos valores no se alcanzan debido a que las perturbaciones aleatorias modifican la humedad de entrada antes de que el sistema alcance el estado estacionario correspondiente.

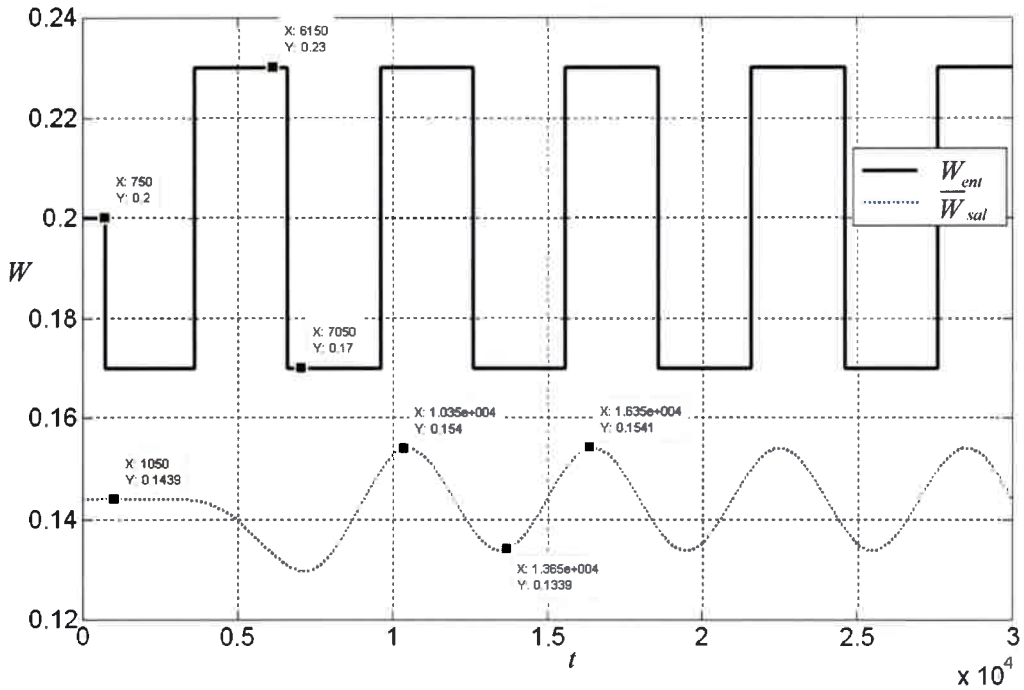


Figura 6.3. Respuesta dinámica del sistema frente a una variación oscilatoria (onda cuadrada) en la humedad de entrada del grano.

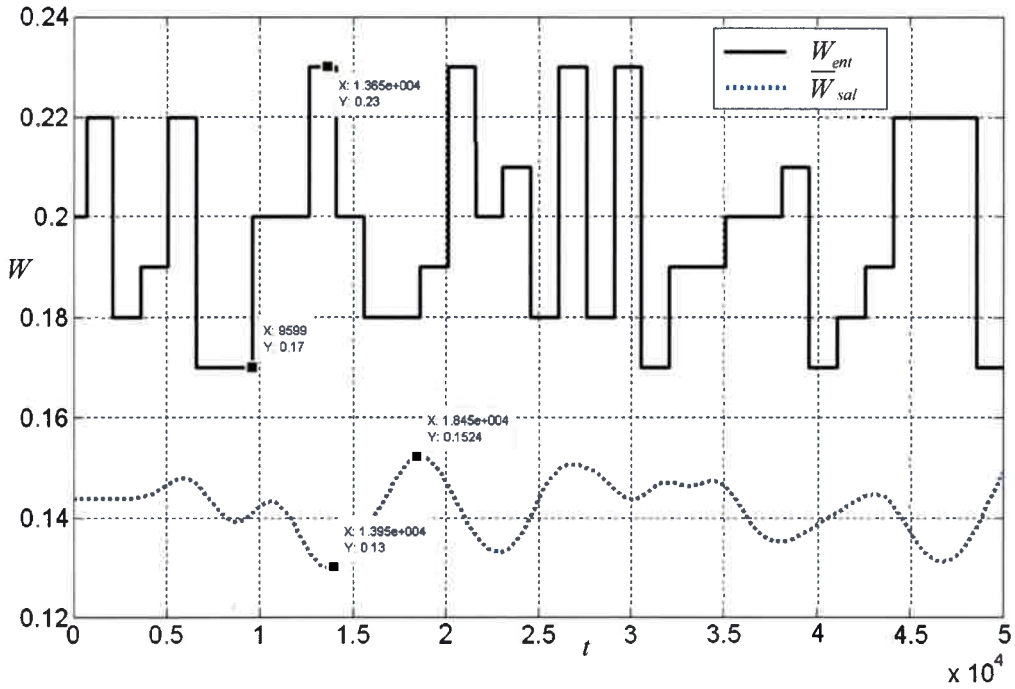


Figura 6.4. Respuesta dinámica del sistema frente a una variación aleatoria de humedad de entrada del grano.

6.2.2 Perturbaciones en la temperatura de entrada del grano

Las Figuras 6.5 y 6.6 muestran las respuestas dinámicas del sistema frente a perturbaciones en la temperatura de entrada del grano. Dichas perturbaciones no resultaron significativas, dado que modificaciones del 15% en esta variable implican cambios porcentuales de 0,5% en la humedad de salida del grano.

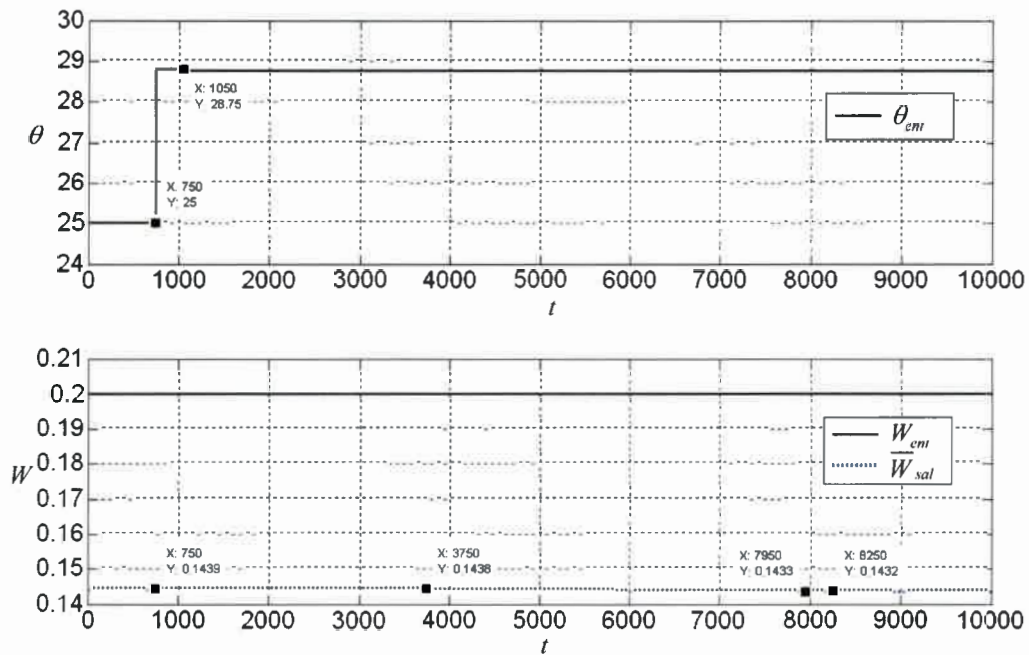


Figura 6.5. Respuesta dinámica del sistema frente a un escalón del 15% en la temperatura de entrada del grano

Un incremento en la temperatura del grano implica que el aire tiene que entregar menos energía para calentar al mismo, de esta manera el aire tendrá una humedad relativa menor (por tener mayor temperatura) teniendo más capacidad de secado. Además, al incrementarse la temperatura del grano, aumenta el coeficiente de difusión por lo que el secado será mayor. De esta manera, al aumentar la temperatura del grano, la humedad de salida es menor que en el estado estacionario original, pero el efecto no es considerable.

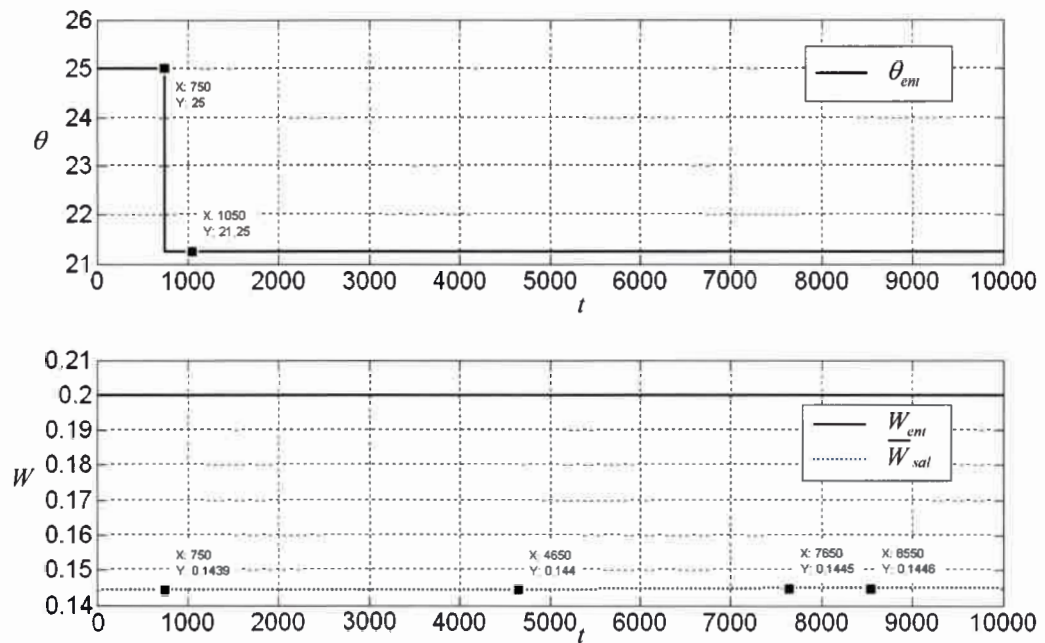


Figura 6.6. Respuesta dinámica del sistema frente a un escalón de -15% en la temperatura de entrada del grano.

Al ser menor la temperatura de entrada del grano, es mayor el gasto energético para calentar al mismo por lo que disminuye la energía disponible para evaporar agua. Además el coeficiente de difusión de humedad dentro del grano tiende a disminuir. De esta manera, la humedad de salida del sólido se incrementa, pero al igual que en el caso anterior el cambio no es considerable.

Al igual que lo que ocurre con las perturbaciones en la humedad de entrada del grano, el sistema presenta un gran tiempo muerto desde que se excita hasta que se observan cambios en la humedad de salida del grano. Este tiempo es de aproximadamente 4000 segundos. No obstante, en este caso el sistema alcanza el nuevo estado estacionario en un tiempo menor. Esto implica que el incremento de temperatura en la entrada del grano no afecta al sistema lo suficiente como para que puedan notarse cambios importantes en la capacidad de secado. Por otro lado, cómo sólo se están teniendo en cuenta 4 decimales en la variable de salida, y el cambio no es grande, puede que el sistema no haya alcanzado el estado estacionario y el tiempo en alcanzarlo sea mayor.

6.2.3 Perturbaciones en la temperatura de aire de secado

En la Tabla 6.2 se presentan las humedades de salida promedio del sólido en estado estacionario para diferentes escalones en la temperatura del aire de entrada, mientras que las Figuras 6.7 y 6.8 muestran las respuestas dinámicas del sistema.

Como puede observarse, una variación del 15% en la temperatura de entrada del aire (en °C) produce un cambio inverso del 8% en la humedad promedio de salida del sólido

Tabla 6.2 Humedad promedio de salida del sólido de estado estacionario para distintas escalones en la temperatura del aire de entrada

T_{in1}	Amplitud del escalón de entrada	T_{in2}	\bar{W}_{sal1}	\bar{W}_{sal2}	Amplitud del escalón de salida obtenido
70	10%	77	0,1439	0,1360	-5%
70	15%	81	0,1439	0,1320	-8%
70	20%	84	0,1439	0,1280	-11%
70	-10%	63	0,1439	0,1516	5%
70	-15%	60	0,1439	0,1553	8%
70	-20%	56	0,1439	0,1591	11%

Como puede verse en la Tabla 6.2, la amplitud del escalón provocado en la humedad es aproximadamente la mitad (en valor absoluto) de la amplitud del escalón realizado en la temperatura del aire de entrada. Como se vio en la sección 5.4, al aumentar la temperatura del aire, disminuye la humedad de equilibrio y por ello el grano alcanza humedades menores.

En lo que refiere a la dinámica del sistema, en las Figuras 6.7 y 6.8 se puede observar una demora en la respuesta de 300 segundos. Esto se debe a que, como se mencionó, la simulación se realiza en períodos de 300 segundos. Para perturbaciones en las condiciones del aire de secado, no existe tiempo muerto ya que al ser el secadero de flujo cruzado, el grano de salida toma contacto inmediato con el aire de entrada viéndose afectado instantáneamente por cualquier perturbación en éste. Al igual que cuando se excitó el sistema con perturbaciones en la entrada del grano, el tiempo necesario para alcanzar el nuevo estado estacionario fue de aproximadamente 7000 segundos.

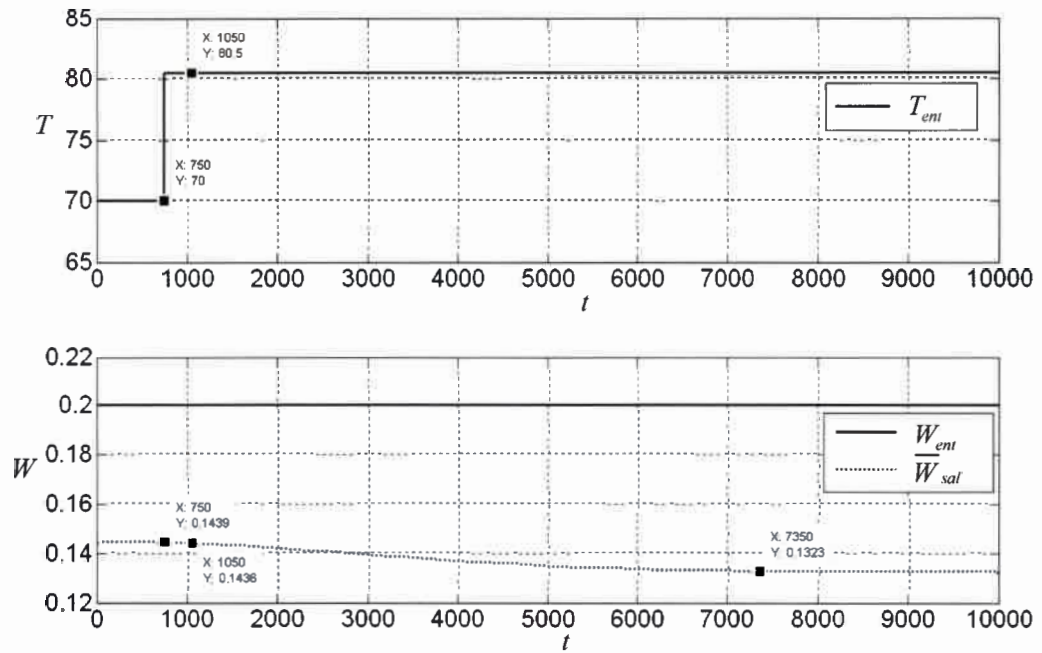


Figura 6.7. Respuesta dinámica del sistema frente a un escalón de +15% en la temperatura de entrada del aire

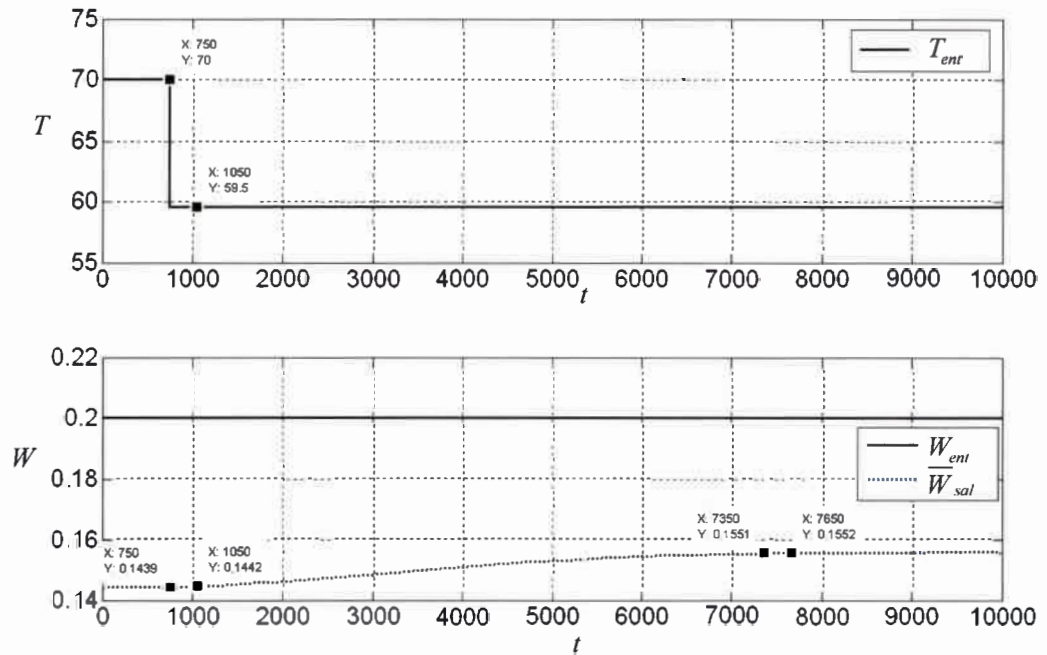


Figura 6.8. Respuesta dinámica del sistema frente a un escalón de -15% en la temperatura de entrada del aire

6.2.4 Perturbaciones en el flujo de granos

Las Figuras 6.9 y 6.10 muestran las respuestas dinámicas del sistema frente a perturbaciones en el flujo de granos. Cuando se modifica el flujo, se modifica el tiempo de residencia de los granos que están dentro del secadero por lo que es de esperar que las variaciones en la salida se produzcan inmediatamente después que se produce la perturbación. No existe tiempo muerto en este caso. El tiempo necesario para alcanzar el nuevo estado estacionario es aproximadamente 7000 segundos.

Los cambios ocasionados en la humedad promedio del grano a la salida del secadero son aproximadamente del 5%.

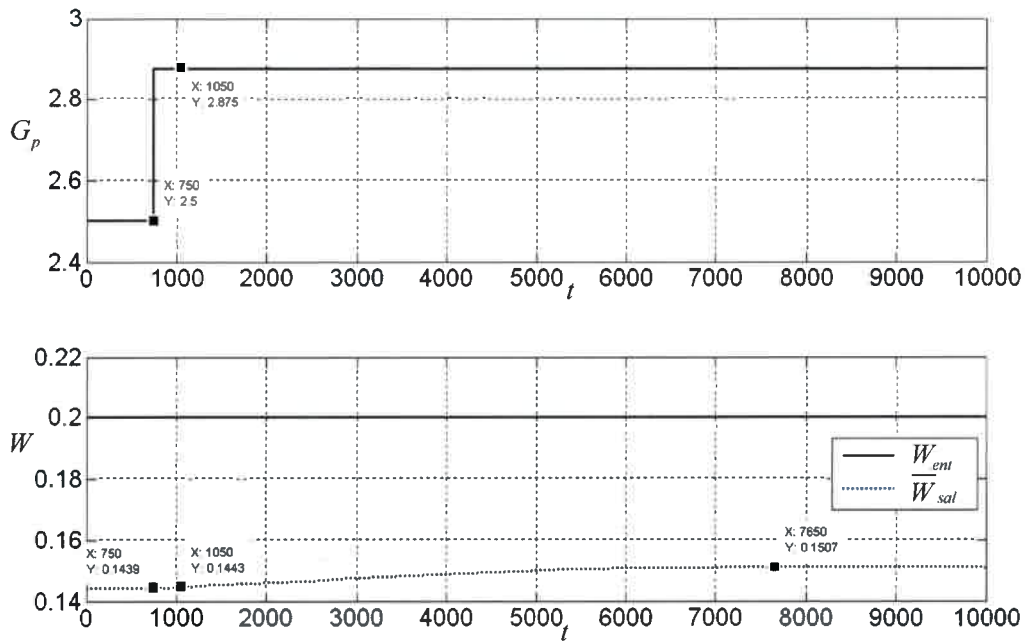


Figura 6.9. Respuesta dinámica del sistema frente a un escalón del 15% en el flujo de granos

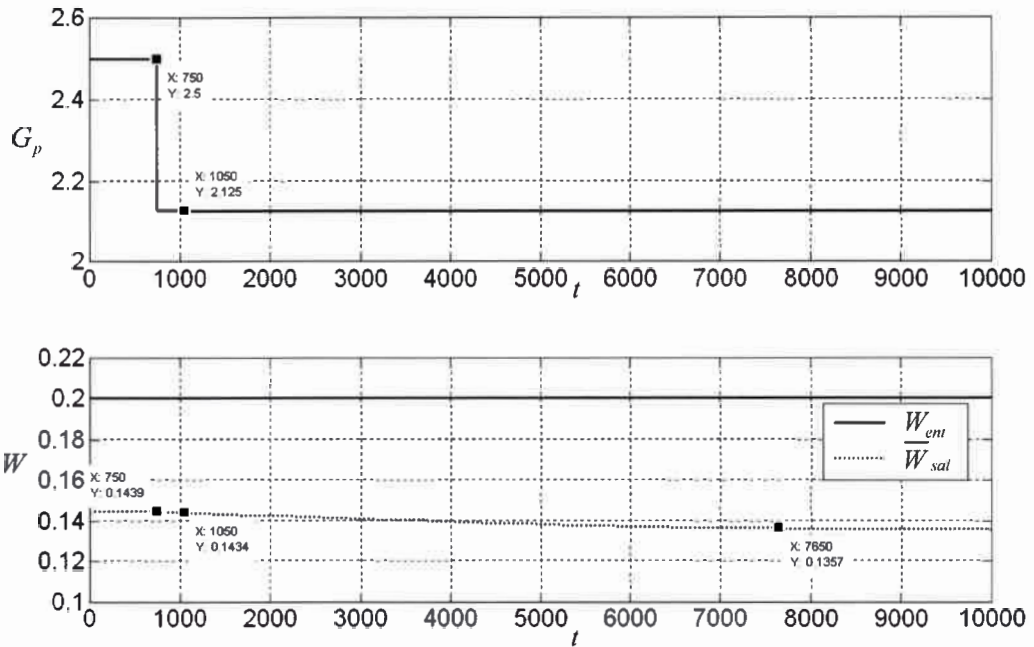


Figura 6.10. Respuesta dinámica del sistema frente a un escalón de -15% en el flujo de granos

6.2.5 Perturbaciones en el flujo de aire

Las Figuras 6.11 y 6.12 muestran las respuestas dinámicas del sistema frente a perturbaciones en forma de escalón en el flujo de aire. Al incrementarse el flujo de aire, la atmósfera interior del secadero estará más seca por lo que es de esperar que la humedad que alcance el grano sea menor. El sistema responde instantáneamente a este estímulo dado que el aire de entrada está en contacto con el grano de salida, no obstante en las figuras mencionadas se observa que el tiempo en que comienzan los cambios en la salida es aproximadamente 600 segundos. Esto se debe a que la velocidad de respuesta del sistema frente a esta perturbación es baja y dado que sólo se están mostrando 4 decimales en la humedad, no se observan los cambios. El tiempo necesario para alcanzar el estado estacionario es aproximadamente 7000 segundos.

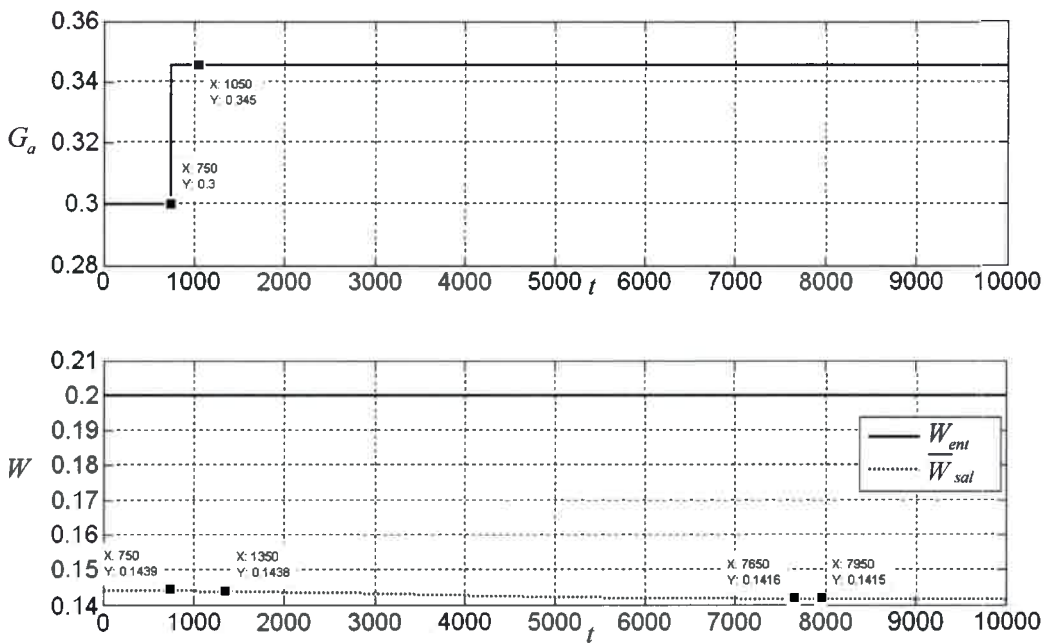


Figura 6.11. Respuesta dinámica del sistema frente a un escalón de +15% en el flujo de aire

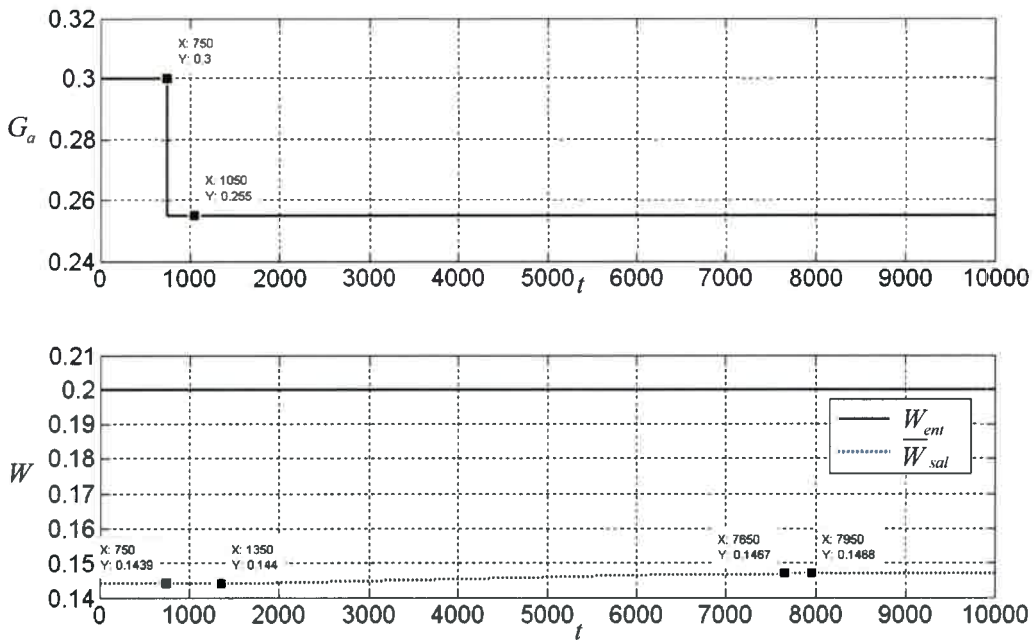


Figura 6.12. Respuesta dinámica del sistema frente a un escalón de -15% en el flujo de aire

6.3 Conclusiones

En la Tabla 6.3, se muestra un resumen de las características de las respuestas dinámicas analizadas en el presente capítulo. Como puede verse, existen tiempos muertos considerables cuando se modifican las condiciones de entrada del grano.

Para las variables que afectan directamente a la salida de los granos, como el flujo de granos, la temperatura y el flujo del aire, no hay tiempo muerto en la respuesta. Esto permite inferir que estas variables pueden ser utilizadas como variables manipuladas para controlar el sistema, llevando nuevamente la humedad de salida a un valor cercano al deseado.

Tabla 6.3. Características de las respuestas dinámicas analizadas

Variable	Valor		\bar{W}_{sal}	Variación porcentual humedad	Tiempo para llegar al estado estacionario (desde que comienza la respuesta)	Tiempo para comienzo respuesta
	Inicial	Final				
W_{in}	0,2	0,23	0,1655	15%	6900	2700
	0,2	0,17	0,1227	-15%	6900	2700
θ_{in}	25	28,75	0,1432	0,5%	4500	3750
	25	21,25	0,1446	-0,5%	3900	4350
T_{in}	70	80,5	0,1322	-8%	6900	0
	70	59,5	0,1553	8%	6900	0
G_p	2,5	2,875	0,1507	5%	6900	0
	2,5	2,125	0,1357	-6%	6900	0
G_a	0,3	0,345	0,1415	-2%	6600	0
	0,3	0,255	0,1468	2%	6600	0

A través del simulador desarrollado es posible estudiar el comportamiento dinámico del sistema, determinando la influencia de distintas perturbaciones en las variables de entrada en la variable de salida más relevante, la humedad de los granos. Específicamente lo que se relaciona con la respuesta dinámica: el tiempo transcurrido hasta que empieza a variar la respuesta (tiempo muerto) y el tiempo requerido para alcanzar el nuevo estado estacionario.

CAPÍTULO 7: APLICACIONES EN CONTROL AUTOMÁTICO

7.1 Introducción

En este capítulo se utiliza el simulador desarrollado para evaluar diferentes configuraciones de control. Se consideran los lazos realimentados dentro de un esquema de control proporcional, integral y derivativo (PID). En el capítulo 6, cuando se analizó la dinámica del secadero a lazo abierto se encontró que, bajo las condiciones operativas la humedad promedio de salida es de 0,1439 b.s., un poco inferior a la humedad segura de almacenamiento (0,156 b.s.). Inicialmente se determina mediante un controlador proporcional el flujo de granos necesario para alcanzar la humedad deseada. Posteriormente, para el estado estacionario deseado se determinan los parámetros de sintonía propuestos por Ziegler – Nichols y los propuestos por Tyreus – Luyben obtenidos ambos mediante el método de Ziegler – Nichols (1942). Finalmente se analiza la respuesta del sistema a lazo cerrado utilizando la mejor configuración encontrada frente a perturbaciones en la humedad de entrada.

7.2 Determinación del flujo de granos requerido para alcanzar la humedad deseada

Para determinar el flujo de granos que permita alcanzar la humedad de salida deseada (de almacenamiento seguro), se agrega al secadero un lazo de realimentado con un control proporcional. En la Figura 7.1 se presenta un esquema simplificado del sistema. La humedad promedio de salida es comparada con la humedad promedio deseada, dicho error es utilizado por el controlador para determinar el nuevo flujo de granos el cuál modifica el estado del secadero, obteniéndose un nuevo valor de humedad a la salida. Este ciclo se repite hasta que se alcanza el estado estacionario.

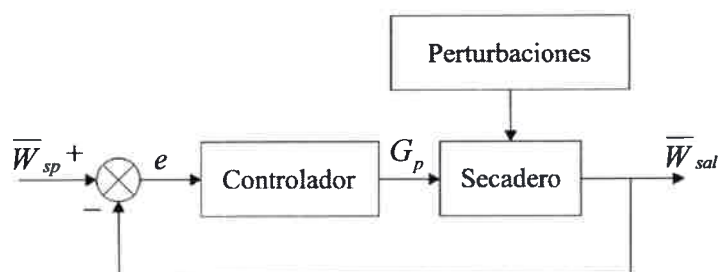


Figura 7.1 Esquema del secadero con el lazo de control

En este análisis, la variable manipulada es el flujo de granos. La ley de control que define el valor del flujo de granos en el esquema de control PID, es función del error en el tiempo ($e(t)$) entre la humedad de salida del grano y la humedad deseada (humedad de set point, W_{sp}). Dicha funcionalidad se muestra en la ecuación (7.1).

$$G_p(t) = K_c \left(e(t) + \frac{1}{\tau_i} \int e(t) dt + \tau_D \frac{de(t)}{dt} \right) + G_p^0 \quad (7.1)$$

Donde G_p^0 es el valor de polarización del controlador, es decir la señal de salida del controlador cuando la humedad de salida es igual a la de set point. K_c es la ganancia proporcional del controlador, τ_i la constante de tiempo integral o tiempo de reset y τ_D la constante de tiempo derivativa.

En la Figura 7.2, se observa la respuesta dinámica del sistema utilizando una ganancia en el controlador igual a 2 ($K_c = 2$). Puede observarse cómo va variando el flujo de granos en el tiempo a raíz de la diferencia entre la humedad deseada y la obtenida a la salida del secadero. Con un flujo de granos de $3,23 \frac{kg}{m^2s}$ se logra el valor deseado de humedad de salida. Este nuevo estado estacionario es alcanzado en un período de tiempo aproximado de 7 horas.

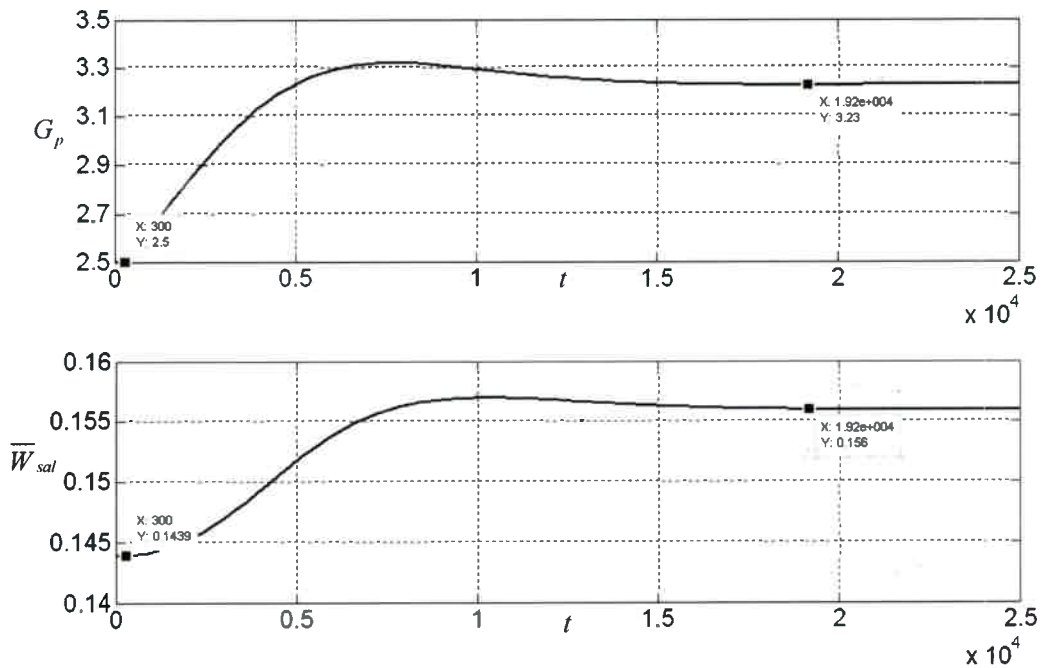


Figura 7.2. Determinación del flujo de granos para lograr la humedad final promedio deseada.

7.3 Sintonización del controlador

Partiendo del estado estacionario anterior se determinan los parámetros de sintonía del controlador mediante el método de Ziegler – Nichols. Para ello, se realiza una serie de simulaciones a lazo cerrado utilizando control únicamente proporcional. Estando el sistema en el estado estacionario deseado se introduce una perturbación tipo escalón del 10% en la humedad de entrada (Inicialmente la humedad es de 0.2 b.s. y se cambia a 0.22 b.s.). Posteriormente se debe determinar la ganancia del controlador que produce una respuesta dinámica oscilatoria con amplitud constante. El valor de esta ganancia (K_u) se denomina ganancia final y el período de la oscilación resultante (P_u) se denomina período final. Estos valores se utilizan para sintonizar el controlador según lo señalado en la Tabla 7.1.

Para determinar la ganancia final, se elige una ganancia cualquiera y se realiza la simulación. Si la respuesta dinámica del sistema oscila con amplitud decreciente, la ganancia elegida resulta baja y la misma debe ser incrementada. Por el contrario, si la

respuesta dinámica oscila con amplitud creciente, la ganancia elegida es alta y la misma debe ser disminuida. Este procedimiento fue realizado para varias ganancias hasta encontrar el adecuado. No obstante en la Figura 7.3 se muestra la respuesta dinámica del sistema frente a un cambio escalón del 10% en la humedad de entrada sólo para tres valores de ganancia del controlador proporcional. Como puede verse, la ganancia que lleva el sistema al límite de la estabilidad es 14,4. Para ganancias mayores (como por ejemplo 19,4), el sistema es inestable, el flujo de granos oscila con amplitud creciente generando una curva de características semejantes en la humedad del grano. Para ganancias menores (como por ejemplo 9,4), el flujo de granos alcanza un valor de estado estacionario para el cual la humedad final promedio del grano alcanza el valor correspondiente al set point (0,156 b.s.).

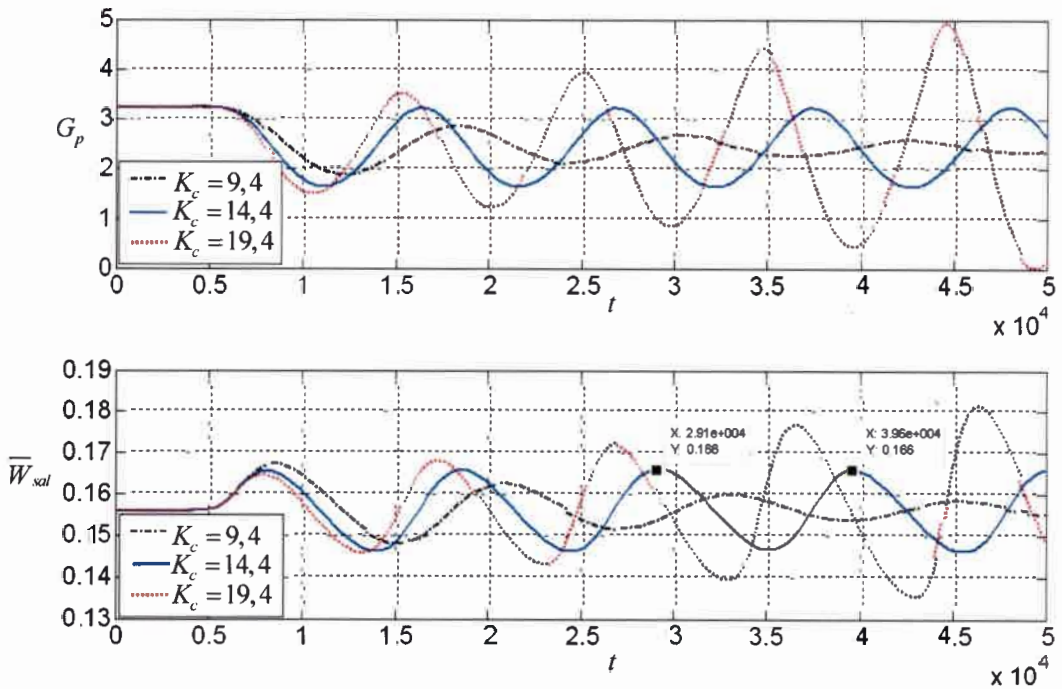


Figura 7.3. Respuesta dinámica del sistema frente a cambios del 1% en el set point para diferentes valores de ganancia.

En la Figura 7.3 puede verse que:

$$K_u = 14,4$$

$$P_t = 10500\text{seg}$$

En la Tabla 7.1 se detallan los parámetros de sintonía propuestos por diferentes autores.

Tabla 7.1. Parámetros de sintonía propuestos

Método	Tipo de controlador		
	P	PI	PID
Ziegler - Nichols	$K_c = \frac{K_u}{2} = 7,2$	$K_c = \frac{K_u}{2,2} = 6,5$ $\tau_I = \frac{P_u}{1,2} = 8750$	$K_c = \frac{K_u}{1,7} = 8,5$ $\tau_I = \frac{P_u}{2} = 5250$ $\tau_D = \frac{P_u}{8} = 1312,5$
Tyreus - Luyben		$K_c = \frac{K_u}{3,2} = 4,5$ $\tau_I = 2,2P_u = 23100$	$K_c = \frac{K_u}{2,2} = 6,5$ $\tau_I = 2,2P_u = 23100$ $\tau_D = \frac{P_u}{6,3} = 1666,7$

7.4 Respuesta a lazo cerrado frente a perturbaciones en la humedad de entrada

En la presente sección se analiza la respuesta de lazo cerrado frente a una perturbación de tipo escalón (del 10%) en la humedad de entrada del grano, sintonizando el controlador con los diferentes parámetros calculados en el punto 7.3. A fin de determinar cuál de ellos presenta la mejor performance.

En la Figura 7.4 y 7.5 se muestra la respuesta dinámica del secadero frente a cambios en la humedad de entrada del grano para diferentes configuraciones de control sintonizadas mediante los parámetros propuestos por Ziegler – Nichols y Tyreus – Luyben respectivamente. En todos los casos, se encuentra que la respuesta es oscilatoria pero estable. El control en teoría es posible ya que el sistema alcanza el estado estacionario deseado. No obstante, los tiempos de establecimiento son inaceptables dado que, en el mejor de los casos, que se corresponde al PID propuesto por Tyreus – Luyben, el tiempo es de 15000 segundos aproximadamente (4,2 horas).

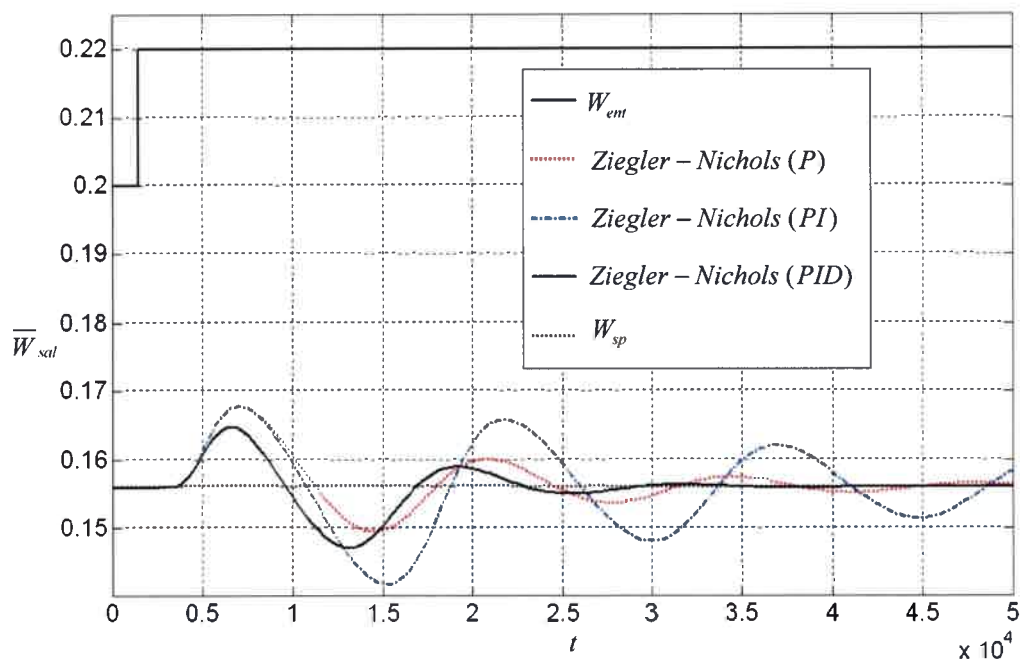


Figura 7.4. Humedad promedio de salida a lazo cerrado bajo diferentes configuraciones de control (parámetros de Ziegler - Nichols).

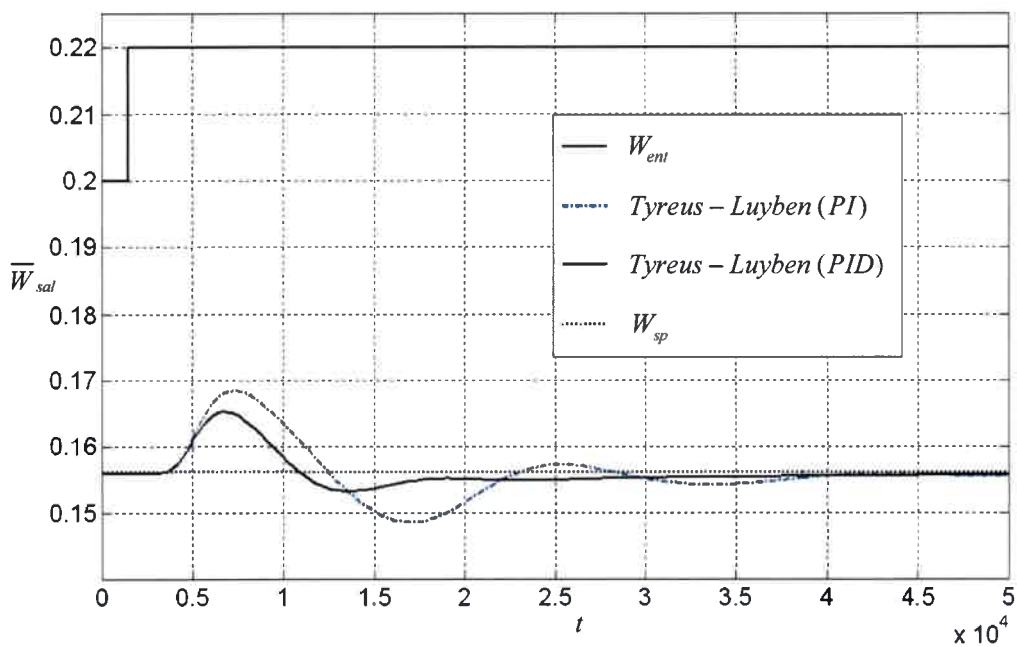


Figura 7.5. Humedad promedio de salida a lazo cerrado bajo diferentes configuraciones de control (parámetros de Tyreus - Luyben).

Para analizar con más detalle esta respuesta, en la Figura 7.6 se muestra la mejor respuesta dinámica obtenida para las configuraciones evaluadas sin incluir el cambio en la humedad de entrada.

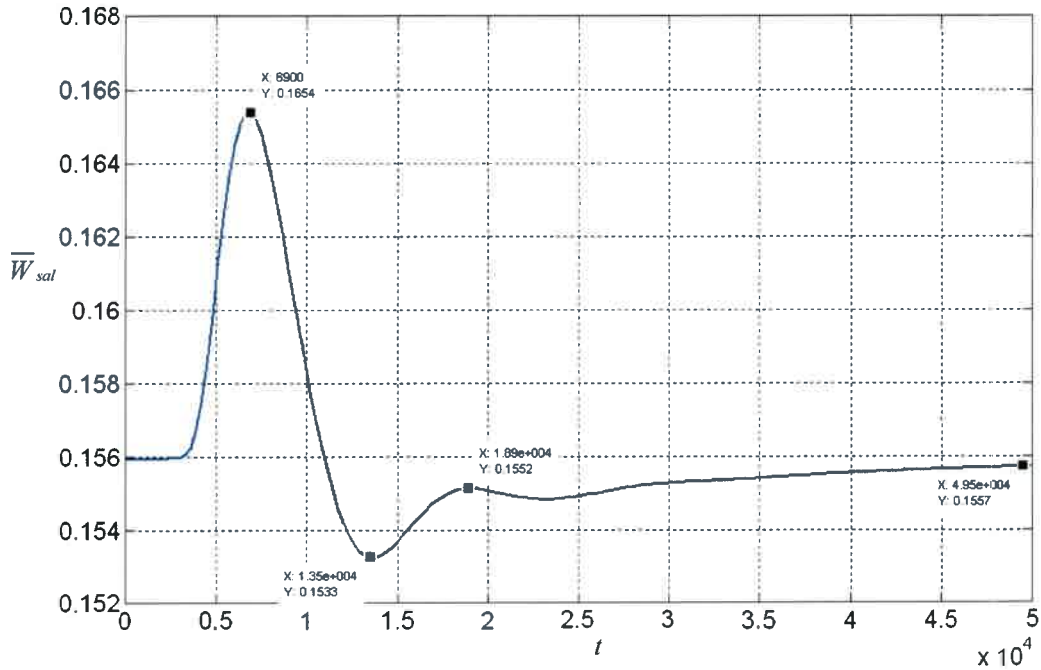


Figura 7.6 Humedad promedio de salida a lazo cerrado bajo con control PID sintonizado con los parámetros de Tyreus – Luyben.

Puede observarse que la humedad promedio de salida más alta es de 0,165, valor que es sólo un 5,8% superior al valor deseado. La respuesta en este caso, no es demasiado oscilatoria y a partir de los 15000 segundos ya se mantiene en valores que no difieren en más del 1% respecto del valor de set point. Por lo que el controlador es capaz de llevar el sistema nuevamente al estado estacionario cuando se producen cambios escalón en la humedad de entrada del grano.

No obstante, en la Figura 7.7 se muestra que el rendimiento del controlador es muy bajo si se quiere controlar el sistema frente a cambios aleatorios en la humedad de entrada. En este caso, la humedad de salida promedio alcanza valores cercanos a 0,174 (11% superior al valor deseado). Además, en la misma figura se muestra el comportamiento del sistema a lazo abierto. Se puede observar que resulta incluso mejor la respuesta del sistema a lazo abierto que con el control PID.

Esto se debe a que el tiempo en que comienza a responder el sistema es muy alto, por lo que los cambios que provoca el control no tienen efecto inmediato y al haber cambios aleatorios permanentes en la entrada la salida oscila aleatoriamente en mayor medida que a lazo abierto.

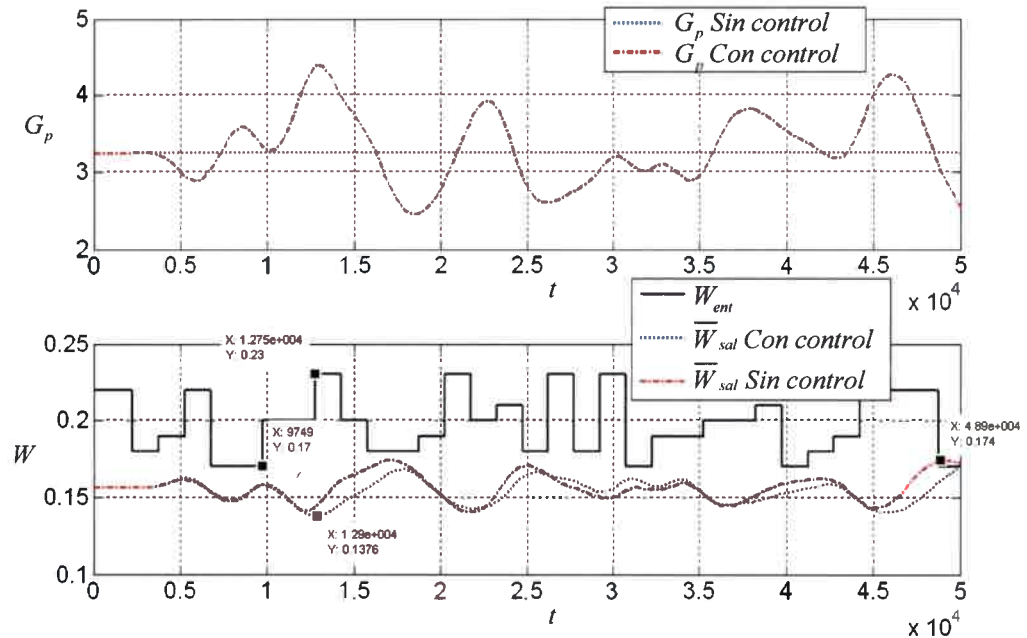


Figura 7.7. Humedad promedio de salida frente a cambios aleatorios en la humedad de entrada.

7.5 Conclusiones

Al cerrar el lazo, se pudo determinar el flujo de granos que permite alcanzar el valor deseado en la humedad de salida. Se encontró que, de las configuraciones de control convencionales analizadas, la mejor es la de control proporcional, integral y derivativo sintonizado con los parámetros propuestos por Tyreus – Luyben.

Para perturbaciones del tipo escalón en la humedad de entrada del grano, con la configuración propuesta se logra controlar el sistema aunque el tiempo de establecimiento es elevado. Para otro tipo de señales, como las aleatorias este controlador convencional simple no resulta apropiado. Se requiere aplicar sistemas de control avanzado.

CAPÍTULO 8: CONCLUSIONES Y METAS FUTURAS

8.1 Conclusiones

La soja es el principal producto agrario de la Argentina, representando además uno de los primeros generadores de divisas del país. Para disminuir las pérdidas en la cosecha, es preferible cosechar el grano con un contenido de humedad alto que resulta mayor al seguro para su conservación. Para ello, se requiere realizar el secado del mismo para evitar pérdidas poscosecha. Con el objetivo de disminuir pérdidas por deficiencia en la operación de secado, ésta debe realizarse bajo un adecuado sistema de control.

En el presente trabajo se desarrolló un modelo matemático del proceso de secado en un secadero de aire caliente, a flujo cruzado, que es uno de los más utilizados en el país. Para el desarrollo se plantearon los balances de masa y energía en los granos y en el aire. A partir de estos balances se obtuvieron las ecuaciones de variación de la humedad y temperatura en granos y aire. Además fue necesario desarrollar una ecuación de la cinética de secado de capa delgada, para ello se utilizaron datos experimentales de bibliografía. Mediante la resolución de las ecuaciones diferenciales se obtuvo un simulador que permite analizar el proceso de secado de granos de soja en secaderos de flujo cruzado.

Se evaluó la sensibilidad paramétrica del modelo a fines de detectar aquellas propiedades de mayor importancia. Se encontró que el área superficial por unidad de volumen es el parámetro que mayor influencia tiene tanto en la humedad y temperatura del grano como en la humedad y temperatura del aire. Otros parámetros que influyen significativamente en estas variables son la densidad del grano, el parámetro k utilizado en la expresión de la cinética de secado de capa delgada, la porosidad del lecho, el calor específico del aire y el calor de sorción.

El simulador desarrollado permite estudiar el funcionamiento del secadero, tanto en estado estacionario como no estacionario (simulación dinámica). Se analizaron los valores de humedad final promedio del grano en estado estacionario para diferentes condiciones operativas. Esto puede aplicarse para detectar aquellas variables que pueden ser utilizadas como variables manipuladas en algoritmos de control. Por ejemplo, si se incrementa el flujo de aire de secado, el grano alcanza menores humedades. No obstante a partir de un determinado valor de flujo los cambios en la humedad no son notorios, por lo que el flujo de aire podría utilizarse en un control de

rango partido. Es decir, utilizar el flujo de aire en primera instancia como variable manipulada hasta cierto valor y luego manipular otra para lograr llevar la humedad del grano de salida al valor deseado. Para las condiciones de secado analizadas, el flujo de granos resultó una variable de interés para el control de la humedad final del grano dado que, a diferencia del flujo de aire, existe un mayor rango de variabilidad en el que la humedad cambia considerablemente.

Además de las simulaciones de estado estacionario, se realizaron simulaciones dinámicas mediante las cuales se encontró que el sistema es auto regulado, es decir al perturbarse con cambios del tipo escalón en las variables de entrada evoluciona a un nuevo estado estacionario sin la necesidad de control. Obviamente el nuevo estado estacionario no se corresponde con el deseado por lo que surge la necesidad de implementar algoritmos de control que puedan llevar el sistema al punto de trabajo correspondiente con el cumplimiento de la norma de calidad.

En este trabajo se probaron lazos de control clásicos del tipo PID utilizando como variable manipulada el flujo de granos. De las configuraciones de control que se evaluaron, se encontró que el controlador que mejor responde frente a cambios escalón en la humedad de entrada es el tipo PID configurado con los parámetros de Tyreus – Luyben. Si bien, en teoría el control propuesto es suficiente para llevar el sistema al valor de set point, se tiene que el tiempo en alcanzar valores que no se alejen más del 1% del valor deseado es inaceptable (6 horas aproximadamente). Además, si en lugar de perturbar el sistema con cambios del tipo escalón, se lo perturba con entradas aleatorias, el sistema oscila dentro de un margen de humedades que se aleja demasiado del valor deseado. Por lo que el control convencional es insuficiente.

8.2 Metas futuras y propuestas

En el desarrollo del trabajo se encontró que el modelo es sensible frente a la variabilidad en algunos parámetros. En trabajos futuros se puede indagar con mayor detalle los parámetros más importantes a fines de ajustarlos con mayor precisión o incluso expresarlos en función de las variables del proceso.

Por otro lado, se pudo corroborar que el control proporcional, integral y derivativo no es suficiente para obtener un buen comportamiento del sistema frente a perturbaciones en la entrada ya que es muy lento de responder. A partir del simulador,

se espera poder aplicar configuraciones de control avanzado o desarrollar nuevos algoritmos de control que permitan alcanzar el estado estacionario deseado en un tiempo razonable frente a cambios en las variables de entrada.

ANEXO I: CÓDIGO DEL SIMULADOR

Programa principal del simulador:

```

% Programa principal secadero de flujo cruzados

% Se utiliza la cinética exponencial obtenida a partir de datos
% experimentales proporcionados por Giner y Gely (2006)

% 1) Notación (se listan en este apartado para ser ubicadas
facilmente)

% avp = Area por unidad de volumen para el grano
% Cps = Calor específico del grano seco
% CpW = Calor específico del agua pura
% Cpv = Calor específico del vapor
% Cpa = Calor específico del aire seco
% dg = densidad del grano seco
% da = densidad del aire seco
% defrg2 = Difusividad efectiva / radio del grano^2 = Deff/Rg^2
% Dx = Delta x utilizado en la discretización
% Dy = Delta y utilizado en la discretización
% e = Porosidad del lecho
% Ga = Flujo másico de aire seco por unidad de superficie
% Gg = Flujo másico de grano seco por unidad de superficie
% ha = humedad del aire (base seca)
% hRa = humedad relativa del aire
% ht = Coeficiente de transferencia convectiva
% n = cantidad de nodos en la dirección del flujo de aire
% m = cantidad de nodos en la dirección del flujo de granos
% j = contador de columnas
% i = contador de filas
% Lx = Longitud del secadero en la dirección x (flujo del aire)
% Ly = Longitud del secadero en la dirección y (flujo del grano)
% R = Velocidad de secado
% Rg = radio del grano
% Tg = temperatura del grano
% Ta = temperatura del aire
% We = humedad de equilibrio
% Wg = humedad del grano (base seca)

clear all

tic

% Variables globales
global n m Gp Ga dg da Dx e Dy c1 c2 c3 Cpa Rg avp Cpv Cps CpW Tamb
hramb Psamb Wg0 condiciones Pamb Mv Ma ha0 T0sec

% 2) Definición de variables

% 2.1) Datos del equipo
Lx = 0.3;
Ly = 20;

% 2.2) Tamaño de malla
n = 5;
m = 15;

```

```

Dx = Lx/(n-1);
Dy = Ly/(m-1);

% 2.3) Propiedades del agua, del aire, del grano y del lecho
% 2.3.1) Propiedades del agua
Mv = 18;
CpW = 4187;
Cpv = 1883;
% 2.3.2) Propiedades del aire
Ma = 29;
da = 1.12;
Cpa = 1008;
% 2.3.3) Propiedades del grano
dg = 1116.51;
Cps = 1637;
Rg = 3.3e-3;
avp = 3/Rg;
% Constantes para el cálculo de humedad de equilibrio halsey
barrozo
c1 = -0.0067;
c2 = 3.02;
c3 = 1.508;
% 2.3.4) Propiedades del lecho
e = 0.41;

% 2.4) Condiciones de secado
% 2.4.1) Condiciones ambientales
Tamb = 25;
hramb = 0.7;
Pamb = 101325;
% 2.4.2) Condiciones de entrada
Wg0 = 0.2;
Tg0 = 25;
T0sec = 70;
Ga = 0.3;
Gp = 3.23;
% 2.4.2.1) Valores de entrada calculados
Psamb = exp(54.119-6547.1/(Tamb+273.16))-
4.23*log(Tamb+273.16));
ha0 = (hramb*Mv/Ma*Psamb)/(Pamb-hramb*Psamb);
T0 = Tamb;

% 2.5) Humedad deseada (set point)
Wdes = 0.156;

% constante
t1 = 60000;

% 3) Puesta en marcha del secadero.
% 3.1) Solución de ecuaciones diferenciales
% 3.1.1) Vector de condiciones iniciales.
for g = 1:n*m
    condiciones(4*(g-1)+1) = Wg0;
    condiciones(4*(g-1)+2) = ha0;
    condiciones(4*(g-1)+3) = Tg0;
    condiciones(4*(g-1)+4) = T0;
end
for g = 1:m

```

```

        nv4 = 4*n*(g-1)+ 4;
        condiciones(nv4) = T0sec;
    end
    % 3.1.2 solución
    [t,sol] = odel5s('funsec4',[0 t1], condiciones);

% 3.2) Variables finales
g = 0;
for i = 1:m
    for j = 1:n
        g = g+1;
        Wf(i,j) = sol(length(t),4*(g-1)+1);
        hf(i,j) = sol(length(t),4*(g-1)+2);
        Tgf(i,j)= sol(length(t),4*(g-1)+3);
        Tf(i,j) = sol(length(t),4*(g-1)+4);
    end
end
for cont = 1:m
    y(cont) = Dy*(cont-1);
end
for cont2 = 1:n
    x(cont2) = Dx*(cont2-1);
end

% 3.3) Valores finales a la salida
Wsal = Wf(m,:);
Tgsal = Tgf(m,:);
hsal = hf(:,n);
Tsal = Tgf(:,n);

% 3.4) Variables finales promedio a la salida
Wsalpr = sum(Wsal)/length(Wsal);
Tgsalpr = sum(Tgsal)/length(Tgsal);
hsalpr = sum(hsal)/length(hsal);
Tsalpr = sum(Tsal)/length(Tsal);

% 4) SIMULACION DINAMICA
% 4.1) Datos de control
% 4.1.1) Lazo abierto/cerrado y tipo controlador
lazo = 1; % 1 = Lazo cerrado, 0 = Lazo abierto
TC = 3; % 1 = Control P, 2 = Control PI, 3 = Control PID
VM = 1; % 1 = Manipula Gp, 2 = Manipula T0sec

% 4.1.2) Parámetros del controlador
Kc = 6.5;
tI = 23100;
tD = 1666.7;

% 4.2) Variables auxiliares en la simulación
tiemposol = 300; % Tiempo de cada período de simulación
tiemposimax = 80000; % Tiempo total de simulación
ciclos = ceil(tiemposimax/tiemposol); % cantidad de ciclos que
se realizarán
error(1)=0; % primer vector del error ("set point - humedad
medida")
inter= 0;
tt(1) = 0;

```

```

    criterio =0 ; % Criterio para cortar la simulacion 1 =
habilitado, 0 = anulado (en este caso si simula todo el tiempo
definido)

    % 4.2.1) Valores iniciales para la temperatura, humedad,
caudal de
    % granos y temperatura del aire de secado
    for j = 1:n
    Wsall(j) = sol(length(t),4*n*(m-1)+4*(j-1)+1);
    Tgl(j) = sol(length(t),4*n*(m-1)+4*(j-1)+3);
    end
    Wsalpr1(1) = sum(Wsall)/length(Wsall);
    Tgpr1(1) = sum(Tgl)/length(Tgl);
    Gp1(1) = Gp;
    T0sec1(1) =T0sec;
    cont = 0;
    corte =2; % Es un valor inicial que tiene que ser mayor que
1, despues se modifcica dentro de la simulación

    % 4.3) Definición de cambios
    % 4.2.1) Cambios en el set point
    Wdes = Wdes; % Si son iguales no habrá cambios
    % 4.2.2) Cambios en la carga (perturbaciones)
    ciclos1 = ciclos+1;
    Tamb = 25;
    hramb = 0.7;
    Ga = 0.3;
    Wg02 = ones(1,ciclos1)*0.22;
    %Wg02 = [0.22 0.22 0.22 0.22 0.22 0.18 0.18 0.18 0.18 0.18
0.19 0.19 0.19 0.19 0.19 0.22 0.22 0.22 0.22 0.22 0.17 0.17 0.17 0.17
0.17 0.17 0.17 0.17 0.17 0.17 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2
0.23 0.23 0.23 0.23 0.23 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2 0.18 0.18 0.18 0.18 0.18
0.18 0.18 0.18 0.18 0.18 0.19 0.19 0.19 0.19 0.19 0.23 0.23 0.23 0.23
0.23 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2 0.21 0.21 0.21 0.21 0.21 0.18 0.18 0.18 0.18
0.18 0.23 0.23 0.23 0.23 0.23 0.23 0.18 0.18 0.18 0.18 0.18 0.23 0.23 0.23
0.23 0.23 0.17 0.17 0.17 0.17 0.17 0.17 0.19 0.19 0.19 0.19 0.19 0.19 0.19
0.19 0.19 0.19 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2 0.2 0.21 0.21 0.21
0.21 0.21 0.17 0.17 0.17 0.17 0.17 0.17 0.18 0.18 0.18 0.18 0.18 0.19 0.19
0.19 0.19 0.19 0.22 0.22 0.22 0.22 0.22 0.22 0.22 0.22 0.22 0.22 0.22 0.22
0.22 0.22 0.22 0.22 0.17 0.17 0.17 0.17 0.17 0.17 0.2 0.2 0.2];
    Tg0 = 25;
    T0sec = 70;
    % Valores calculados
    Psamb = exp(54.119-6547.1/(Tamb+273.16)-
4.23*log(Tamb+273.16));
    ha0 = (hramb*18.02/28.97*Psamb)/(101325-hramb*Psamb);
    T0 = Tamb;
    Went(1) = Wg02(1); % humedad de entrada

    % 4.4) Simulación dinámica
    aux3= 0;
    while and(corte > 1,tt<tiemposimax)
    cont = cont +1;
    Gp1(cont+1) = Gp;
    T0sec1(cont+1) = T0sec;
    for j = 1:n
    Wsall(j) = sol(length(t),4*n*(m-1)+4*(j-1)+1);
    Tgl(j) = sol(length(t),4*n*(m-1)+4*(j-1)+3);
    end

```

```

% Humedad de salida promedio
Wsalpr1(cont+1) = sum(Wsal1)/length(Wsal1);
Tgpr1(cont+1) = sum(Tg1)/length(Tg1);
tt(cont+1) = tiemposol*(cont);

% Humedad de entrada
Went(cont + 1) = Wg02(cont + 1);

%Gráficos
figure(1)

subplot(2,1,2)

plot(tt,Wsalpr1)
if VM ==1

    subplot(2,1,1)

plot(tt,Gp1)
else
    subplot(2,1,1)
    plot(tt,T0sec1)
end

% Error, integral y derivada del mismo
error(cont+1) = Wdes-Wsalpr1(cont+1);
inter(cont+1) =
inter(cont)+(error(cont+1)+error(cont))*tiemposol/2;
derer(cont+1) = (error(cont+1)-error(cont))/tiemposol;

% Acción de control
if lazo == 1
    if VM == 1
        if TC == 1 % Ley de control
            Gp = Gp + Kc*error(cont+1);
        end
        if TC == 2
            Gp = Gp + Kc*(error(cont+1)+1/tI*inter(cont+1));
        end
        if TC ==3
            Gp = Gp +
Kc*(error(cont+1)+1/tI*inter(cont+1)+tD*derer(cont+1));
        end
    end

    if VM ==2
        if TC == 1 % Ley de control
            T0sec = T0sec - Kc*error(cont+1);
        end
        if TC == 2
            T0sec = T0sec -
Kc*(error(cont+1)+1/tI*inter(cont+1));
        end
        if TC ==3
            T0sec = T0sec -
Kc*(error(cont+1)+1/tI*inter(cont+1)+tD*derer(cont+1));
        end
    end
end

```

```

        end
    end
end

% Definición de nuevas condiciones iniciales
for g = 1:n*m
    condiciones2(4*(g-1)+1) = sol(length(t),4*(g-1)+1);
    condiciones2(4*(g-1)+2) = sol(length(t),4*(g-1)+2);
    condiciones2(4*(g-1)+3) = sol(length(t),4*(g-1)+3);
    condiciones2(4*(g-1)+4) = sol(length(t),4*(g-1)+4);
end
for g = 1:n
    condiciones2(4*(g-1)+1) = Wg02(cont);
    condiciones2(4*(g-1)+3) = Tg0;
end
for g = 1:m
    condiciones2(4*n*(g-1)+2) = ha0;
    condiciones2(4*n*(g-1)+4) = T0sec;
end

[t, sol] = odel5s('funsec4',[0 tiemposol], condiciones2);

% Criterio de corte
aux1(cont) = abs(Wsalpr1(cont+1)-Wsalpr1(cont));
aux2 = floor(2500/tiemposol);
if criterio ==1;
    if cont >20
        if aux1(cont)<1e-5
            if aux3>aux2
                corte =0;
            end
            aux3 = aux3+1;
        end
    end
end
end

end
end
end

```

Definición de ecuaciones diferenciales.

```

% Definicion de ecuaciones diferenciales para el secadero.

% Metodo solucion: DIFERENCIA HACIA ATRAS

% Nomenclatura:
% dy = contiene las ecuaciones diferenciales.
% sol = variables de la solución.
% sol(4k-3) = humedad del grano en el nodo (4k-3)
% sol(4k-2) = humedad del aire en el nodo (4k-3)
% sol(4k-1) = temperatura del grano en el nodo (4k-3)
% sol(4k) = temperatura del aire en el nodo (4k-3)

% nomenclatura para los subíndices de las variables.
% n = cantidad de columnas
% m = cantidad de filas
% j = contador de columnas

```

```

% i = contador de filas
% alfa = 1 humedad del grano
% alfa = 2 humedad del aire
% alfa = 3 temperatura del grano
% alfa = 4 temperatura del aire
% luego, el súbindice correspondiente para la variable es:
% nv = número de variable  $4i(m-1)+4(k-1)+\text{alfa}$ 

function dy = funsec4(t,sol)
global n m Gp Ga dg da Dx e Dy c1 c2 c3 Cpa Rg avp Cpv Cps CpW Mv Ma
Pamb

% matrices auxiliares

% Matrices auxiliares para el grano
    % banderas (1 o 0) para evitar exceder el límite de nodos y
validar
    % derivada

        % Punto anterior
        fp_lg = ones(m,n);
        fp_lg(1,:) = 0;

        % Punto siguiente
        fplg = ones(m,n);
        fplg(m,:) = 0;

        % Validar derivada
        derivag = ones(m,n);
        derivag(1,:) = 0;

    % Coeficientes para la aproximación numérica de la derivada

    % Punto anterior
    p_lg = ones(m,n)*(-1);
    p_lg(1,:) = 0;

    % Punto actual
    p0g = ones(m,n);

    % Punto siguiente
    plg = zeros(m,n);

    % Coeficiente del delta
    deltag = ones(m,n);

% Matrices auxiliares para el aire
    % banderas (1 o 0) para evitar exceder el límite de nodos y
validar
    % derivada

        % Punto anterior
        fp_la = ones(m,n);
        fp_la(:,1) = 0;

```

```

% Punto siguiente
fpla = ones(m,n);
fpla(:,n) = 0;

% Validar derivada
derivaa = ones(m,n);
derivaa(:,1) = 0;
%derivaa(1,:) = 0;

% Coeficientes para la aproximación numérica de la derivada

% punto anterior
p_la = ones(m,n)*(-1);
p_la(:,1) = 0;

% Punto actual
p0a = ones(m,n);

% Punto siguiente
pla = zeros(m,n);

% Coeficiente del delta
deltaa = ones(m,n);

% time = t
% Ecuaciones diferenciales
for i = 1:m
    for j = 1:n

        % Cálculo del n° de variable
        nv1 = (4*n*(i-1)+4*(j-1) + 1);
        nv2 = (4*n*(i-1)+4*(j-1) + 2);
        nv3 = (4*n*(i-1)+4*(j-1) + 3);
        nv4 = (4*n*(i-1)+4*(j-1) + 4);

        % Difusividad (Diego con datos de Sergio)
        Ea = 2.676465170376723e4;
        A = 9.088931996763363e-7;
        def = A*exp(-Ea/(8.314*(sol(nv3)+273.16)));

        % Humedad de equilibrio y humedad de saturación

        Pssec = exp(54.119-6547.1/(sol(nv4)+273.16) -
4.23*log(sol(nv4)+273.16));
        Pv = Pamb*sol(nv2)/(Mv/Ma+sol(nv2));
        hRa = Pv/Pssec;
        We = 0.01*(-exp(c1*sol(nv4)+c2)/log(hRa))^(1/c3); % humedad
de equilibrio halsey
        has = Pssec/(Pamb-Pssec)*Mv/Ma;

        % Calor latente
        Lw = 8314/Mv*(6547.1-4.23*(sol(nv4)+273.16));

        % Calor de sorción
        Lg = Lw+8314*(sol(nv3)+273.16)^2/Mv*(-
c1*exp(c1*sol(nv3)+c2)*(0.01/sol(nv1)^(c3)));

```



```

% Coeficiente de transferencia de calor aire - grano
mua = 1.735e-5+4.318e-8*sol(nv4);
KTa = 0.0238+6.838e-5*sol(nv4);
Pr = mua*Cpa/KTa;
Re = Ga*2*Rg/mua;
ht = 3.27*Cpa*Ga*(Re)^(-0.65)*(Pr)^(-2/3);

% Velocidad de secado
b = 2.046144985928765; %obtenido mediante el programa de
ajuste propio
k = b*def*(avp)^2;
%R = (sol(nv1)-We)*(k)*heaviside(has-sol(nv2)); % El
heaviside es para que no sature el aire
R = (sol(nv1)-We)*(k);

% Definición de derivadas espaciales
dW_dy = (p_lg(i,j)*sol(nv1-4*n*fp_lg(i,j)) +
p0g(i,j)*sol(nv1) + plg(i,j)*sol(nv1+4*n*fp_lg(i,j))
)/(deltag(i,j)*Dy);
dh_dx = (p_la(i,j)*sol(nv2-4*fp_la(i,j)) +
p0a(i,j)*sol(nv2) + pla(i,j)*sol(nv2+4*fp_la(i,j))
)/(deltaa(i,j)*Dx);
dTg_dy = (p_lg(i,j)*sol(nv3-4*n*fp_lg(i,j)) +
p0g(i,j)*sol(nv3) + plg(i,j)*sol(nv3+4*n*fp_lg(i,j))
)/(deltag(i,j)*Dy);
dTa_dx = (p_la(i,j)*sol(nv4-4*fp_la(i,j)) +
p0a(i,j)*sol(nv4) + pla(i,j)*sol(nv4+4*fp_la(i,j))
)/(deltaa(i,j)*Dx);

% Definición de ecuaciones diferenciales
dy(nv1,:) = derivag(i,j)*(-Gp/(dg*(1-e))*dW_dy-R);
dy(nv2,:) = derivaa(i,j)*(-Ga/(da*e)*dh_dx+(1-
e)*dg*R/(da*e));
dy(nv3,:) = derivag(i,j)*(ht*avp*(sol(nv4)-
sol(nv3))/(dg*(Cps+CpW*sol(nv1)))-R*Lg/(Cps+CpW*sol(nv1))-Gp/(dg*(1-
e))*dTg_dy);
dy(nv4,:) = derivaa(i,j)*(-Ga/(da*e)*dTa_dx-ht*avp*(1-
e)*(sol(nv4)-sol(nv3))/(da*e*(Cpa+sol(nv2)*Cpv))+(1-
e)*dg*R*Cpv*(sol(nv3)-sol(nv4))/(da*e*(Cpa+sol(nv2)*Cpv)));

end
end

```

**ANEXO II: DATOS DE SIMULACIÓN PARA ANALISIS DE
SENSIBILIDAD MEDIANTE EL MÉTODO ESTADÍSTICO**

Anexo II. Datos de simulación para análisis de sensibilidad mediante el método estadístico

x_{α_p}	x_k	x_ρ	x_ε	x_{Cpa}	x_{Lg}	\bar{W}_{sal}	$\bar{\theta}_{sal}$	\bar{h}_{sal}	\bar{T}_{sal}
-1	-1	-1	-1	-1	-1	0,1504	59,44	0,0193	41,33
-1	-1	-1	-1	-1	1	0,1514	58,58	0,0192	40,40
-1	-1	-1	-1	1	-1	0,1489	60,25	0,0195	42,84
-1	-1	-1	-1	1	1	0,1499	59,44	0,0194	41,92
-1	-1	-1	1	-1	-1	0,1525	59,84	0,0191	41,84
-1	-1	-1	1	-1	1	0,1535	59,01	0,0190	40,93
-1	-1	-1	1	1	-1	0,1511	60,62	0,0193	43,35
-1	-1	-1	1	1	1	0,1521	59,84	0,0191	42,45
-1	-1	1	-1	-1	-1	0,1474	58,79	0,0196	40,56
-1	-1	1	-1	-1	1	0,1485	57,89	0,0195	39,59
-1	-1	1	-1	1	-1	0,1458	59,64	0,0198	42,08
-1	-1	1	-1	1	1	0,1469	58,79	0,0197	41,11
-1	-1	1	1	-1	-1	0,1495	59,20	0,0194	41,08
-1	-1	1	1	-1	1	0,1506	58,33	0,0193	40,14
-1	-1	1	1	1	-1	0,1480	60,03	0,0196	42,59
-1	-1	1	1	1	1	0,1490	59,21	0,0195	41,66
-1	1	-1	-1	-1	-1	0,1473	58,79	0,0196	40,56
-1	1	-1	-1	-1	1	0,1484	57,90	0,0195	39,60
-1	1	-1	-1	1	-1	0,1457	59,65	0,0198	42,08
-1	1	-1	-1	1	1	0,1468	58,80	0,0197	41,11
-1	1	-1	1	-1	-1	0,1495	59,21	0,0194	41,08
-1	1	-1	1	-1	1	0,1505	58,34	0,0193	40,14
-1	1	-1	1	1	-1	0,1480	60,03	0,0196	42,59
-1	1	-1	1	1	1	0,1490	59,21	0,0195	41,66
-1	1	1	-1	-1	-1	0,1442	58,13	0,0200	39,77
-1	1	1	-1	-1	1	0,1455	57,19	0,0198	38,78
-1	1	1	-1	1	-1	0,1425	59,03	0,0202	41,29
-1	1	1	-1	1	1	0,1437	58,14	0,0200	40,29
-1	1	1	1	-1	-1	0,1464	58,55	0,0197	40,30
-1	1	1	1	-1	1	0,1476	57,64	0,0196	39,33
-1	1	1	1	1	-1	0,1448	59,42	0,0199	41,82
-1	1	1	1	1	1	0,1459	58,56	0,0198	40,85
1	-1	-1	-1	-1	-1	0,1441	58,19	0,0200	39,79
1	-1	-1	-1	-1	1	0,1453	57,26	0,0198	38,80
1	-1	-1	-1	1	-1	0,1423	59,08	0,0202	41,31
1	-1	-1	-1	1	1	0,1436	58,20	0,0200	40,32
1	-1	-1	1	-1	-1	0,1463	58,61	0,0197	40,33
1	-1	-1	1	-1	1	0,1475	57,70	0,0196	39,35
1	-1	-1	1	1	-1	0,1446	59,48	0,0200	41,85
1	-1	-1	1	1	1	0,1458	58,62	0,0198	40,87
1	-1	1	-1	-1	-1	0,1410	57,52	0,0203	39,00
1	-1	1	-1	-1	1	0,1424	56,54	0,0201	37,97

Anexo II. Datos de simulación para análisis de sensibilidad mediante el método estadístico

1	-1	1	-1	1	-1	0,1391	58,45	0,0205	40,51
1	-1	1	-1	1	1	0,1404	57,52	0,0204	39,48
1	-1	1	1	-1	-1	0,1432	57,95	0,0201	39,54
1	-1	1	1	-1	1	0,1445	57,00	0,0199	38,53
1	-1	1	1	1	-1	0,1414	58,85	0,0203	41,05
1	-1	1	1	1	1	0,1427	57,95	0,0201	40,05
1	1	-1	-1	-1	-1	0,1409	57,52	0,0203	39,00
1	1	-1	-1	-1	1	0,1423	56,55	0,0201	37,97
1	1	-1	-1	1	-1	0,1390	58,46	0,0205	40,51
1	1	-1	-1	1	1	0,1404	57,53	0,0204	39,48
1	1	-1	1	-1	-1	0,1431	57,95	0,0201	39,54
1	1	-1	1	-1	1	0,1444	57,00	0,0199	38,53
1	1	-1	1	1	-1	0,1413	58,86	0,0203	41,05
1	1	-1	1	1	1	0,1426	57,96	0,0201	40,05
1	1	1	-1	-1	-1	0,1378	56,83	0,0206	38,20
1	1	1	-1	-1	1	0,1393	55,82	0,0204	37,15
1	1	1	-1	1	-1	0,1357	57,81	0,0209	39,70
1	1	1	-1	1	1	0,1372	56,85	0,0207	38,65
1	1	1	1	-1	-1	0,1400	57,27	0,0204	38,74
1	1	1	1	-1	1	0,1414	56,28	0,0202	37,71
1	1	1	1	1	-1	0,1380	58,22	0,0207	40,25
1	1	1	1	1	1	0,1395	57,28	0,0205	39,21
0	0	0	0	0	0	0,1448	58,34	0,0199	40,28
0	0	0	0	0	0	0,1442	58,23	0,0200	40,18
0	0	0	0	0	0	0,1453	58,45	0,0198	40,39
2,8284	0	0	0	0	0	0,1363	56,63	0,0208	38,15
0	2,8284	0	0	0	0	0,1406	57,46	0,0203	39,21
0	0	2,8284	0	0	0	0,1407	57,45	0,0203	39,21
0	0	0	2,8284	0	0	0,1481	58,96	0,0196	41,09
0	0	0	0	2,8284	0	0,1426	59,49	0,0202	42,28
0	0	0	0	0	2,8284	0,1465	57,11	0,0197	38,95
-2,8284	0	0	0	0	0	0,1543	60,20	0,0189	42,63
0	-2,8284	0	0	0	0	0,1496	59,33	0,0194	41,50
0	0	-2,8284	0	0	0	0,1495	59,33	0,0194	41,50
0	0	0	-2,8284	0	0	0,1418	57,77	0,0202	39,54
0	0	0	0	-2,8284	0	0,1475	56,90	0,0195	37,97
0	0	0	0	0	-2,8284	0,1430	59,65	0,0201	41,75



Bibliografía

- Aregba, A.W., J.P. Nadeau (2007). "Comparison of two non-equilibrium models for static grain deep-bed drying by numerical simulations". *Journal of Food Engineering*, 78, 1174-1187.
- Bird, R.; W. Stewart y E. Lightfoot (2008). "Fenómenos de Transporte". Limusa Wiley
- Bragachini, M. y C. Casini (2005). "Soja: Eficiencia de Cosecha y Poscosecha". Manual técnico N° 3. INTA – PRECOP.
- Bakker-Arkema, F. W. ; Q. Liu (1997). "Stochastic Modelling of Grain Drying : Part 3 . Analysis of Crossflow Drying". *Journal of agricultural engineering research*, 66, 281-286.
- Becker, H. A. (1959). "A Study of Dissusion in Solids of Arbitrary Shape with Application to the Drying of the Wheat Kernel". *Journal of Applied Polymer Science*, 1 (2), 212-226. 1959.
- Brooker, D. B., F. W. Bakker-Arkema y C. W. Hall (1992). "Drying and Storage of Grains and Oilseeds". Van Nostrand Reinhold, Nueva York.
- Barrozo, M. A. S., D. J. M. Sartori, J.T. Freire, J.A. Achar (1996). "Discrimination of equilibrium moisture equations for soybean using nonlinearity measures". *Drying Technology*. 14, 1779 – 1794.
- Barrozo, M. A. S., H. M. Henrique, D. J. M. Sartori y J. T. Freire (1999). "Drying of Soybean Seeds in a Crossflow Moving Bed". *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 77, 1121-1126.
- Chen, X. D. y A. S. Mujumdar (2008). "Drying Technologies in Food Processing". Blackwell Publishing Ltd.
- Crank, J. (1975) *The Mathematics of Diffusion*, 2nd Edition. Oxford University Press.
- Constantinides A. y N. Mostoufi (1999). *Numerical Methods for Chemical Engineers with Matlab Applications*, Prentice Hal PTR
- Courtois, A. L., A. Lebert, J.C. Lasseran y J.J. Bimbenet (1993). "Dynamic Modelling and Simulation of Industrial Corn Dryers". *Computers Chemical Engineering*, 17, 209-214.

- De Dios, C. A. (1996). "Secado de Granos y Secadoras". Publicado por Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Oficina Regional para América Latina y el Caribe.
- Farkas, I.; P. Remenyi, P.; Biro, A. (2000). "Modelling aspects of grain drying with a neural network". *Computers and Electronics in Agriculture*, 29, 99–113.
- Gely, M.G. y S. A. Giner (2007). "Difussion coefficient relationships during drying of soybean cultivars." *Biosystems Engineering*. 96, 213 – 222.
- Giner S. A., F. Borrás, J. L. Robutti y M. C. Añón (1994). "Drying Rates of 25 Argentinian Varieties of Soybean: A Comparative Study". *Lebensm wiss Technology*, 27, 308-313.
- Giner S. A., R. H. Mascheroni y M. E. Nellist (1996). "Cross-Flow Drying of Wheat. A Simulation Program with a Diffusion-Based Deep-Bed Model and a Kinetic Expression for Viability Loss Estimations". *Drying Technology*, 14 (7&8) 1625-1672.
- Giner, S.A., D. M. Bruce y S. Mortimore (1998). "Two Dimensional Model of Steady-State Mixed-Flow Grain Drying. Part 1. The Model". *Journal of Agricultural Engineering Research*, 71(1) 37-50.
- Giner, S.A.; Bruce, D.M. (1998). "Two Dimensional Model of Steady-State Mixed-Flow Grain Drying. Part 2. Experimental validation". *Journal of Agricultural Engineering Research* 71(1), 51-66.
- Giner, S. A. (1999). "Diseño de Secadoras Continuas de Trigo. Simulación de la Transferencia de Calor y Materia y de Pérdidas de Calidad". Tesis de Doctor en Ingeniería, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata. <http://163.10.3.252/>.
- Giner, S.A.; Martin Torres Irigoyen, R.; Cicuttín, S.; Fiorentini, C. (2010). The variable nature of Biot numbers in food drying. *Journal of Food Engineering* 101: 214-222.
- Giordano, J. M., N. Sosa y M. Bragachini (2009). "Pérdidas de cosecha de trigo y soja, en función de la evolución tecnológica de las cosechadoras y la importancia de su regulación diaria". *Información Técnica de Cultivos de Verano*. Publicación Miscelánea N° 115.
- Heath, M.T. (2002). *Scientific computing, an introductory survey*. 2da edición. McGraw-Hill.

-
- Hoffman, J.D. (1992). *Numerical Methods for Engineers and Scientists*. McGraw-Hill.
- Hossain, M.A., B.K. Bala, M.A. Setter (2003). "Simulation of natural air drying of maize in cribs". *Simulation Modelling Practice and Theory*, 11, 571–583.
- Hu, Z.; Wang, H.; Xie, H.; Wu, F.; Chen, Y.; Cao, S. (2010) Mathematical models of crossflow grain drying and their applications. *Nongye Gongcheng Xuebao* . Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 26 (1), 76-82.
- Johnson A.L, P. J. White y R. Galloway (2008). "Soybeans. Chemistry, Production, Processing and Utilization". AOCS Press.
- Jumah, R. Y., A. S. Mujumdar y V.G.S. Raghavan (1995). *Handbook of Industrial Drying Vol. 2, 2^oed.* Marcel Dekker Inc., New York.
- Kuehl Robert O, (2001). "Diseño de experimentos: Principios estadísticos de diseño y análisis de investigación". Capítulo 13, Editorial Thomson Learning.
- Kibar, H., Ozturk, T. (2008). Physical and mechanical properties of soybean. *Int. Agrophysics*, 22, 239
- Lacerda, A. F., M. H. Lisboa y M.A.S. Barrozo (2005). "Heat and mass transfer in a countercurrent moving bed dryer". *Applied Thermal Engineering*, 25, 2641-2652.
- Lira, T.S., M.A.S. Barrozo y A.J. Assis (2009). "Concurrent moving bed dryer modeling: Sensitivity of physicochemical parameters and influence of air velocity profiles". *Applied Thermal Engineering*. 29, 892-897.
- Liu, X.; Chen, X.; Wu, W; Peng, G. (2007). "A neural network for predicting moisture content of grain drying process using genetic algorithm". *Food Control* 18, 928-933.
- Liu, Q. ; M . D . Montross ; F . W . Bakker-Arkema (1997). "Stochastic Modelling of Grain Drying : Part 1 . Experimental Investigation". *Journal of agricultural engineering research*, 66 , 267-273.
- Liu, Q. ; F . W . Bakker-Arkema (1997). "Stochastic Modelling of Grain Drying : Part 2. Model Development". *Journal of agricultural engineering research*, 66, 275-280.
- Liu, Q. y Bakker-Arkema, F.W. (2001a). "Automatic Control of Crossflow Grain Dryers, Part 1: Development of a Process Model". *Journal of Agricultural Engineering Research*. 80(1), 81-86.
- Liu, Q. y Bakker-Arkema, F.W. (2001b). "Automatic Control of Crossflow Grain Dryers, Part 2. Design of a model-predictive controller". *Journal of Agricultural Engineering Research*. 80(2), 173-181.

-
- Liu, Q. y Bakker-Arkema, F.W. (2001c). "Automatic Control of Crossflow Grain Dryers, Part 3: Field testing of a Model-Predictive controller". *Journal of Engineering Research*. 80(3), 245-250.
- Liu, Q. y Bakker-Arkema, F.W. (2001). "A model-predictive controller for grain drying". *Journal of Food Engineering* . 49,321-326.
- Liu, X.; Chen, X.; Wu, W; Zhang, Y. (2006). "Process control base on principal component analysis for maize drying". *Food Control* 17, 894-899.
- Lutfy, O. F. S. B. Mohd Noor, K. A. Abbas, M. H. Marhaban (2008). "Some control strategies in agricultural grain driers: A review". *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 6(2), 74-85.
- Marchant, J.A. (1985). "Control of High Temperature, Continuous Flow Grain Driers". *Agricultural Engineer*, 40 145-149.
- Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. Sistema Integrado de Información. Agropecuaria – SIIA. <http://www.sii.gov.ar/index.php/series-por-tema/agricultura> (10/06/2011).
- Moreira, R. Bakker-Arkema, F.W. (1992). "Grain Dryer Controls: a Review". *Cereal Chemistry*, 69 (4), 390-396.
- Naghavi, Z., A. Moheb, S. Ziaei-rad (2010). "Numerical simulation of rough rice drying in a deep-bed dryer using non-equilibrium model". *Energy Conversion and Management*, 51, 258–264.
- Nybrant, T. G. (1989). "Modelling and Adaptive Control of Concurrent-Flow Driers. *Computers and Electronics in Agriculture*, 3 243-253.
- Platt, D., T. R. Rumsey y A. Palazoglu (1991). "Dynamics and Control of Cross-Flow Grain Dryers". *Drying Technology*, 9, 27-60.
- Platt, D., A. Palazoglu y T.R. Rumsey (1992). "Dynamics and Control of Cross-Flow Grain Dryers II. A feedforward-Feedback control Strategy". *Drying Technology*, 10(2), 333-363.
- Rumsey, T. R. y C.O. Rovedo (2001). "Two-dimensional simulation model for dynamic cross-flow rice drying". *Chemical Engineering and Processing*. 40, 355-362.
- Shampine, L. F. and M. W. Reichelt (1997), "The MATLAB ODE Suite," *SIAM Journal on Scientific Computing*, 18, 1-22.

- Srivastava, V.K., J. John (2002). "Deep bed grain drying modeling". *Energy Conversion and Management*, 43, 1689-1708.
- Wrigley, C., H. Corke y C.E. Walter (2004). "Encyclopedia of Grain Science". Elsevier Academic Press.
- Whitfield, R.D. (1988). "Control of a Mixed-flow Drier Part 1: Design of the Control Algorithm". *Journal of agricultural engineering research*, 41 275-287.
- Yanucci, D. (2000). *Secado. Libro de actualización N°1. Granos & poscosecha Latinoamericana, de la semilla al Consumo*. Buenos Aires. 121-124.
- Zare, D. y Chen, G. (2008). Evaluation of a simulation model in predicting the drying parameters for deep-bed paddy drying. *Computers and Electronics in Agriculture* 68, 78-87.
- Ziegler, J. G. y N. B. Nichols (1942). "Optimum settings for automatic controllers". *Transactions of the A.S.M.E.*, 64, 759-768.

71119

U.N.R.C.
Biblioteca Central



71119