

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y  
AGROINDUSTRIA**

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROGRAMA DE  
SOFTWARE PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE UN SECADOR DE  
DOBLE TAMBOR**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL  
TÍTULO DE INGENIERA QUÍMICA**

**PAULINA EMPERATRIZ LOYA PACHACAMA**  
paulireina@hotmail.es

**DIRECTOR: ING. GASTÓN GUERRA SAN LUCAS**  
gaston.guerra@epn.edu.ec

**Quito, Marzo 2010**

© Escuela Politécnica Nacional 2010  
Reservados todos los derechos de reproducción

## **DECLARACIÓN**

Yo Paulina Emperatriz Loya Pachacama, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

---

Paulina Emperatriz Loya Pachacama

## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Paulina Emperatriz Loya Pachacama, bajo mi supervisión.

---

Ing. Gastón Guerra  
**DIRECTOR DE PROYECTO**

## **AUSPICIO**

La presente investigación contó con el auspicio financiero del proyecto semilla “ESCALADO Y DISEÑO DE UN SECADOR DE TAMBOR PROTOTIPO PARA DESHIDRATAR PASTAS ALIMENTARIAS”, que se ejecutó en el Departamento de Ciencia de Alimentos y Biotecnología.

## AGRADECIMIENTOS

Este Proyecto de Titulación se pudo culminar gracias al amor de mi vida, para ti mi Dios; si hubiera confiando en mis propias fuerzas de seguro me hubiera rendido; pero aunque muchas veces incrédula, siempre terminé rindiéndome a ti, confiando en que tu mano divina no tardaría en aparecer. Gracias mi Dios porque tus bendiciones siempre se están derramando sobre mí.

Gracias a mi familia, que supo guiar mi camino en la alegría y en la adversidad; y pues, mami gracias por preocuparse por nosotros, nunca nos faltó el desayuno y el apoyo de su parte, siempre acolitando, bueno casi siempre; papi, gracias por confiar en mí. Gracias Ñaño y Ñaña, los quiero, de lejitos, jajaja, mentira, en verdad los quiero, me ayudaron mucho.

Gracias a la Geovy, Majito y Jhonny mis compañer@s y amig@s que estuvieron conmigo cada uno de los semestres que estuvimos en las aulas de la Poli, nuestra Poli. Gracias Aminas porque junto a ustedes me hice popular, jajaja; aunque al final casi que me convierto en búho porque no dormía, jajaja; nunca me olvidaré de ustedes y obvio seguiremos compartiendo muchas cositas todavía, ahora que empieza otra etapa de nuestras vidas. Tengo una lista inmensa de todas las personas que han marcado mi vida, gracias a todos; las cosas no suceden por casualidad, y sé que Dios permite que nos crucemos con las personas adecuadas, gracias mi Dios una vez más.

A la Ing. Neyda Espín gracias mil por brindarme ese apoyo, confianza y paciencia que tanto necesité, gracias.

Gracias Ing. Gastón Guerra por ser mi director, mentor y por enseñarme la lección más importante que pude haber aprendido en toda mi vida estudiantil.

Gracias Ing. Bolívar Izurieta por la ayuda que me impartió en el desarrollo de mi Proyecto de Titulación.

Gracias Ing. Mario Aldás por compartir su sabiduría.

Gracias a todos los Inges que me ayudaron en el momento justo.

Gracias don Rodri y don Hectitor que me ayudaron en las pruebas experimentales. Y un especial agradecimiento a don Rodri, por escucharme.

## **DEDICATORIA**

A mi Dios Todopoderoso,

A mi familia,

A mis amig@s.

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

	<b>PÁGINA</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>XIII</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>XV</b>
<b>1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>1</b>
1.1 SECADO POR CONTACTO	1
1.1.1 GENERALIDADES	1
1.1.2 SECADO POR CONTACTO CON UNA SUPERFICIE CALIENTE	1
1.1.2.1 Principios generales	1
1.1.2.2 Tipos de secadores por contacto	3
1.1.2.3 Transferencia de calor	3
1.1.2.4 Temperatura de la superficie	4
1.1.2.5 Coeficiente de secado por conducción	5
1.2 SECADORES DE TAMBOR	6
1.2.1 INTRODUCCIÓN	6
1.2.2 DESCRIPCIÓN DEL SECADOR DE TAMBOR	6
1.2.3 CLASIFICACIÓN DE LOS SECADORES DE TAMBOR	8
1.2.4 MATERIALES PROCESADOS EN LOS SECADORES DE TAMBOR	8
1.2.5 VARIABLES DE OPERACIÓN DE LOS SECADORES DE TAMBOR	11
1.3 MODELOS MATEMÁTICOS DE SECADORES DE TAMBOR	11
1.3.1 INTRODUCCIÓN	11
1.3.2 MODELOS MATEMÁTICOS DESARROLLADOS	12
1.3.2.1 Mathematical Modeling and Computer Simulation of a Drum Dryer (Modelo Matemático y Simulación en Computador de un Secador de Tambor)	13
1.3.2.2 Ecuaciones de Diseño para Secadores de Tambor	16
<b>2. PARTE EXPERIMENTAL</b>	<b>20</b>
2.1 CARACTERIZACIÓN DEL BANANO Y PROCEDIMIENTO PARA LA ELABORACIÓN DE LA PASTA DE BANANO	20
2.1.1 CARACTERIZACIÓN DEL BANANO	20
2.1.1.1 Determinación de color	20



2.1.1.2	Determinación de sólidos solubles	20
2.1.1.3	Determinación de la humedad inicial	20
2.1.2	PROCEDIMIENTO PARA LA ELABORACIÓN DE LA PASTA DE BANANO	21
2.1.2.1	Selección	21
2.1.2.2	Lavado, pelado y tratamiento antioxidante	21
2.1.2.3	Licuadao	22
2.2	DESHIDRATACIÓN DE LA PASTA DE BANANO	23
2.2.1	DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO	23
2.2.2	FUNCIONAMIENTO DEL SECADOR	23
2.2.3	DISEÑO EXPERIMENTAL	25
2.2.3.1	Presión del vapor	25
2.2.3.2	Separación entre los tambores	25
2.2.3.3	Velocidad de rotación	25
2.2.3.4	Pruebas Experimentales	26
2.3	DESARROLLO DE LOS ALGORITMOS DE CÁLCULO	28
2.4	DISEÑO DEL SOFTWARE PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE UN SECADOR DE DOBLE TAMBOR	36
<b>3.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>38</b>
3.1	CARACTERIZACIÓN DEL BANANO Y PROCEDIMIENTO PARA LA ELABORACIÓN DE LA PASTA DE BANANO	38
3.2	DISEÑO EXPERIMENTAL	39
3.2.1	PRUEBAS EXPERIMENTALES	39
3.2.1.1	Humedad final	39
3.2.1.2	Flujo másico del agua evaporada	43
3.2.1.3	Velocidad de evaporación del agua o Velocidad de secado	46
3.3	DISEÑO DEL SOFTWARE PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE UN SECADOR DE DOBLE TAMBOR	50
3.3.1	TEMPERATURA DE LA SUPERFICIE DE SECADO	50
3.3.2	VELOCIDAD DE EVAPORACIÓN DEL AGUA	54
3.3.3	FLUJO MÁSIKO DEL AGUA EVAPORADA Y FLUJO MÁSIKO DE PRODUCCIÓN	58
3.3.3.1	Flujo másico del agua evaporada	58
3.3.3.2	Flujo másico de producción	60

3.3.4	ÁREA DE LA PELÍCULA DESHIDRATADA	63
3.3.5	ÁREA NOMINAL DE LOS TAMBORES DEL SECADOR	65
3.3.6	LONGITUD Y DIÁMETRO DEL SECADOR	69
3.3.7	CONSUMO DE VAPOR ESPECÍFICO	75
3.3.8	VELOCIDAD DE PRODUCCIÓN	77
<b>4.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>81</b>
4.1	CONCLUSIONES	81
4.2	RECOMENDACIONES	82
<b>5.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>83</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

		PÁGINA
<b>Tabla 1.</b>	Tipo de material a secar y tipo de secador por contacto	3
<b>Tabla 2.</b>	Variables de operación y dimensiones más frecuentes de un secador de tambor	7
<b>Tabla 3.</b>	Clasificación de los secadores de tambor	8
<b>Tabla 4.</b>	Productos procesados secadores de tambor	9
<b>Tabla 5.</b>	Caracterización del banano	38
<b>Tabla 6.</b>	Coeficientes de Significación: Área nominal de los tambores. Parámetro de entrada: Flujo másico de producción	68
<b>Tabla 7.</b>	Coeficientes de Significación: Área nominal de los tambores. Parámetro de entrada: Flujo másico del agua evaporada	68
<b>Tabla 8.</b>	Diámetros y Longitudes del secador: $V_{rc}=6$ rpm; $b=0,20$ mm; Variable= $P_v$	69
<b>Tabla 9.</b>	Diámetros y Longitudes del secador: $V_{rc}=6$ rpm; $P_v=60$ psig; Variable= $b$ . Parámetro de entrada: Flujo másico de producción	70
<b>Tabla 10.</b>	Diámetros y Longitudes del secador: $b=0,20$ mm; $P_v=60$ psig; Variable= $V_{rc}$ . Parámetro de entrada: Flujo másico de producción	70
<b>Tabla 11.</b>	Diámetros y Longitudes del secador; $V_{rc}=6$ rpm; $b=0,20$ mm; Variable= $P_v$ . Parámetro de entrada: Flujo másico del agua evaporada	71
<b>Tabla 12.</b>	Diámetros y Longitudes del secador; $V_{rc}=6$ rpm; $P_v=60$ psig; Variable= $b$ . Parámetro de entrada: Flujo másico del agua evaporada	71
<b>Tabla 13.</b>	Diámetros y Longitudes del secador; $b=0,20$ mm; $P_v=60$ psig; Variable= $V_{rc}$ . Parámetro de entrada: Flujo másico del agua evaporada	72
<b>Tabla 14.</b>	Áreas de los tambores a una $P_v=100$ psig	73
<b>Tabla 15.</b>	Áreas de los tambores a una $P_v=160$ psig	73
<b>Tabla 16.</b>	Dimensiones de los tambores a una $P_v=100$ psig	74
<b>Tabla 17.</b>	Dimensiones de los tambores a una $P_v=160$ psig	74
<b>Tabla 17.</b>	Dimensiones de los tambores a una $P_v=160$ psig, <b>Continuación</b>	75
<b>Tabla 18.</b>	Valores medios de los tiempos de secado y humedad final: $V_{rc}=6$ rpm; $b=0,20$ mm; Variable= $P_v$	103
<b>Tabla 19.</b>	Valores medios de los tiempos de secado y humedad final: $V_{rc}=6$ rpm; $P_v=60$ psig; Variable= $b$	103
<b>Tabla 20.</b>	Valores medios de los tiempos de secado y humedad final: $b=0,20$ mm; $P_v=60$ psig; Variable= $V_{rc}$	104
<b>Tabla 21.</b>	Cantidad de pasta de banano: $V_{rc}=6$ rpm; $b=0,20$ mm; Variable= $P_v$	104

<b>Tabla 22.</b>	Cantidad de pasta de banano: Vrc=6 rpm; Pv=60 psig; Variable=b	104
<b>Tabla 23.</b>	Cantidad de pasta de banano: b=0,20 mm; Pv=60 psig; Variable=Vrc	105
<b>Tabla 24.</b>	Peso de la película deshidratada: Vrc=6 rpm; b=0,20 mm; Variable=Pv	105
<b>Tabla 25.</b>	Peso de la película deshidratada: Vrc=6 rpm; Pv=60 psig; Variable=b	105
<b>Tabla 26.</b>	Peso de la película deshidratada: b=0,20 mm; Pv=60 psig; Variable=Vrc	106
<b>Tabla 27.</b>	Peso del condensado: Vrc=6 rpm; b=0,20 mm; Variable=Pv	106
<b>Tabla 28.</b>	Peso del condensado: Vrc=6 rpm; Pv=60 psig; Variable=b	106
<b>Tabla 29.</b>	Peso del condensado: b=0,20 mm; Pv=60 psig; Variable=Vrc	107
<b>Tabla 30.</b>	Tiempo de secado: Vrc=6 rpm; b=0,20 mm; Variable=Pv	107
<b>Tabla 31.</b>	Tiempo de secado: Vrc=6 rpm; Pv=60 psig; Variable=b	107
<b>Tabla 32.</b>	Tiempo de secado: b=0,20 mm; Pv=60 psig; Variable=Vrc	108
<b>Tabla 33.</b>	Humedad final: Vrc=6 rpm; b=0,20 mm; Variable=Pv	108
<b>Tabla 34.</b>	Humedad final: Vrc=6 rpm; Pv=60 psig; Variable=b	108
<b>Tabla 35.</b>	Humedad final: Pv = 60 psig; b=0,20 mm; Variable=Vrc	109
<b>Tabla 36.</b>	Flujo másico del agua evaporada: Vrc=6 rpm; b=0,20 mm; Variable=Pv	109
<b>Tabla 37.</b>	Flujo másico de evaporación del agua: Vrc=6 rpm; Pv=60 psig; Variable=b	109
<b>Tabla 38.</b>	Flujo másico de evaporación del agua: b=0,20 mm; Pv=60 psig; Variable=Vrc	110
<b>Tabla 39.</b>	Velocidad de evaporación del agua: Vrc=6 rpm; b=0,20 mm; Variable=Pv	110
<b>Tabla 40.</b>	Velocidad de evaporación del agua: Vrc=6 rpm; Pv=60 psig; Variable=b	110
<b>Tabla 41.</b>	Velocidad de evaporación del agua: b=0,20 mm; Pv=60 psig; Variable=Vrc	111
<b>Tabla 42.</b>	Velocidad de evaporación experimental y simulada del agua: Vrc=6 rpm; b=0,20 mm; Variable=Pv	111
<b>Tabla 43.</b>	Velocidad de evaporación experimental y simulada del agua: Vrc=6 rpm; Pv=60 psig; Variable=b	111
<b>Tabla 44.</b>	Velocidad de evaporación experimental y simulada del agua: b=0,20 mm; Pv=60 psig; Variable=Vrc	112
<b>Tabla 45.</b>	Temperatura de la superficie de secado: Vrc=6 rpm; b=0,20 mm; Variable=Pv	112
<b>Tabla 46.</b>	Temperatura de la superficie de secado: Vrc=6 rpm; Pv=60 psig; Variable=b	112

<b>Tabla 47.</b>	Temperatura de la superficie de secado: $b=0,20$ mm; $P_v=60$ psig; Variable= $V_{rc}$	113
<b>Tabla 48.</b>	Flujo másico del agua evaporada experimental y simulado: $V_{rc}=6$ rpm; $b=0,20$ mm; Variable= $P_v$	113
<b>Tabla 49.</b>	Flujo másico del agua evaporada experimental y simulado: $V_{rc}=6$ rpm; $V_{rc}=6$ rpm; $P_v=60$ psig; Variable= $b$	113
<b>Tabla 50.</b>	Flujo másico del agua evaporada experimental y simulado: $b=0,20$ mm; $b=0,20$ mm; $P_v=60$ psig; Variable= $V_{rc}$	114
<b>Tabla 51.</b>	Flujo másico de producción experimental y simulado: $V_{rc}=6$ rpm; $b=0,20$ mm; Variable= $P_v$	114
<b>Tabla 52.</b>	Flujo másico de producción experimental y simulado: $V_{rc}=6$ rpm; $V_{rc}=6$ rpm; $P_v=60$ psig; Variable= $b$	114
<b>Tabla 53.</b>	Flujo másico de producción experimental y simulado: $b=0,20$ mm; $b=0,20$ mm; $b=0,20$ mm; $P_v=60$ psig; Variable= $V_{rc}$	115
<b>Tabla 54.</b>	Área de la película deshidratada experimental y simulada: $V_{rc}=6$ rpm; $b=0,20$ mm; Variable= $P_v$ . Parámetro de entrada: Flujo másico de producción	115
<b>Tabla 55.</b>	Área de la película deshidratada experimental y simulada: $V_{rc}=6$ rpm; $P_v=60$ psig; Variable= $b$ . Parámetro de entrada: Flujo másico de producción	115
<b>Tabla 56.</b>	Área de la película deshidratada experimental y simulada: $b=0,20$ mm; $P_v=60$ psig; Variable= $V_{rc}$ . Parámetro de entrada: Flujo másico de producción	116
<b>Tabla 57.</b>	Área de la película deshidratada experimental y simulada: $V_{rc}=6$ rpm; $b=0,20$ mm; Variable= $P_v$ . Parámetro de entrada: Flujo másico del agua evaporada	116
<b>Tabla 58.</b>	Área de la película deshidratada experimental y simulada: $V_{rc}=6$ rpm; $P_v=60$ psig; Variable= $b$ . Parámetro de entrada: Flujo másico del agua evaporada	116
<b>Tabla 59.</b>	Área de la película deshidratada experimental y simulada: $b=0,20$ mm; $P_v=60$ psig; Variable= $V_{rc}$ . Parámetro de entrada: Flujo másico del agua evaporada	117
<b>Tabla 60.</b>	Área nominal de los tambores del secador experimental y simulada: $V_{rc}=6$ rpm; $b=0,20$ mm; Variable= $P_v$ . Parámetro de entrada: Flujo másico de producción	117
<b>Tabla 61.</b>	Área nominal de los tambores del secador experimental y simulada: $V_{rc}=6$ rpm; $P_v=60$ psig; Variable= $b$ . Parámetro de entrada: Flujo másico de producción	117
<b>Tabla 62.</b>	Área nominal de los tambores del secador experimental y simulada: $b=0,20$ mm; $P_v=60$ psig; Variable= $V_{rc}$ . Parámetro de entrada: Flujo másico de producción	118

<b>Tabla 63.</b>	Área nominal de los tambores del secador experimental y simulada: Vrc=6 rpm; b=0,20 mm; Variable=Pv. Parámetro de entrada: Flujo másico del agua evaporada	118
<b>Tabla 64.</b>	Área nominal de los tambores del secador experimental y simulada: Vrc=6 rpm; Pv=60 psig; Variable=b. Parámetro de entrada: Flujo másico del agua evaporada	118
<b>Tabla 65.</b>	Área nominal de los tambores del secador experimental y simulada: b=0,20 mm; Pv=60 psig; Variable=Vrc. Parámetro de entrada: Flujo másico del agua evaporada	119
<b>Tabla 66.</b>	Flujo másico del vapor experimental y simulado: Vrc=6 rpm; b=0,20 mm; Variable=Pv. Parámetro de entrada: Flujo másico de producción	119
<b>Tabla 67.</b>	Flujo másico del vapor evaporada experimental y simulado: Vrc=6 rpm; Pv=60 psig; Variable=b. Parámetro de entrada: Flujo másico de producción	119
<b>Tabla 68.</b>	Flujo másico del vapor evaporada experimental y simulado: b=0,20 mm; Pv=60 psig; Variable=Vrc. Parámetro de entrada: Flujo másico de producción	120
<b>Tabla 69.</b>	Flujo másico del vapor experimental y simulado: Vrc=6 rpm; b=0,20 mm; Variable=Pv. Parámetro de entrada: Flujo másico del agua evaporada	120
<b>Tabla 70.</b>	Flujo másico del vapor evaporada experimental y simulado: Vrc=6 rpm; Pv=60 psig; Variable=b. Parámetro de entrada: Flujo másico del agua evaporada	120
<b>Tabla 71.</b>	Flujo másico del vapor evaporada experimental y simulado: b=0,20 mm; Pv=60 psig; Variable=Vrc. Parámetro de entrada: Flujo másico del agua evaporada	121
<b>Tabla 72.</b>	Consumo de vapor específico experimental y simulado: Vrc=6 rpm; b=0,20 mm; Variable=Pv. Parámetro de entrada: Flujo másico de producción	121
<b>Tabla 73.</b>	Consumo de vapor específico experimental y simulado: Vrc=6 rpm; Pv=60 psig; Variable=b. Parámetro de entrada: Flujo másico de producción	121
<b>Tabla 74.</b>	Consumo de vapor específico experimental y simulado: b=0,20 mm; Pv=60 psig; Variable=Vrc. Parámetro de entrada: Flujo másico de producción	122
<b>Tabla 75.</b>	Consumo de vapor específico experimental y simulado: Vrc=6 rpm; b=0,20 mm; Variable=Pv. Parámetro de entrada: Flujo másico del agua evaporada	122
<b>Tabla 76.</b>	Consumo de vapor específico experimental y simulado: Vrc=6 rpm; Pv=60 psig; Variable=b. Parámetro de entrada: Flujo másico del agua evaporada	122

<b>Tabla 77.</b>	Consumo de vapor específico experimental y simulado: $b=0,20$ mm; $P_v=60$ psig; Variable= $V_{rc}$ . Parámetro de entrada: Flujo másico del agua evaporada	123
<b>Tabla 78.</b>	Velocidad de producción experimental y simulada: $V_{rc}=6$ rpm; $b=0,20$ mm; Variable= $P_v$ . Parámetro de entrada: Flujo másico de producción	123
<b>Tabla 79.</b>	Velocidad de producción experimental y simulada: $V_{rc}=6$ rpm; $P_v=60$ psig; Variable= $b$ . Parámetro de entrada: Flujo másico de producción	123
<b>Tabla 80.</b>	Velocidad de producción experimental y simulada: $b=0,20$ mm; $P_v=60$ psig; Variable= $V_{rc}$ . Parámetro de entrada: Flujo másico de producción	124
<b>Tabla 81.</b>	Velocidad de producción experimental y simulada: $V_{rc}=6$ rpm; $b=0,20$ mm; Variable= $P_v$ . Parámetro de entrada: Flujo másico del agua evaporada	124
<b>Tabla 82.</b>	Velocidad de producción experimental y simulada: $V_{rc}=6$ rpm; $P_v=60$ psig; Variable= $b$ . Parámetro de entrada: Flujo másico del agua evaporada	124
<b>Tabla 83.</b>	Velocidad de producción experimental y simulada: $b=0,20$ mm; $P_v=60$ psig; Variable= $V_{rc}$ . Parámetro de entrada: Flujo másico del agua evaporada	125
<b>Tabla 84.</b>	Área de los tambores del secador simulada y de empresas comerciales	125
<b>Tabla 85.</b>	Valores de $h_w$ obtenidos para las condiciones de operación experimentales	126
<b>Tabla 86.</b>	Valores de $h$ obtenidos para las condiciones de operación experimentales	126
<b>Tabla 86.</b>	Valores de $h$ obtenidos para las condiciones de operación experimentales, <b>Continuación</b>	127
<b>Tabla 87.</b>	Valores de $h_p$ obtenidos para las condiciones de operación experimentales	127
<b>Tabla 88.</b>	Velocidad del aire para las condiciones de operación experimentales	128
<b>Tabla 89.</b>	Número de revoluciones para las condiciones de operación experimentales	128
<b>Tabla 89.</b>	Número de revoluciones para las condiciones de operación experimentales, <b>Continuación</b>	129
<b>Tabla 90.</b>	Parámetros para el dimensionamiento SETA II	146

## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>PÁGINA</b>
<b>Figura 1.</b> Secador de doble tambor	10
<b>Figura 2.</b> Película del material sobre la superficie del tambor	14
<b>Figura 3.</b> Elemento volumétrico de la película del material	15
<b>Figura 4.</b> Perfil de temperatura en función de la posición angular	18
<b>Figura 5.</b> Perfil de humedad en base seca en función del ángulo recorrido	18
<b>Figura 6.</b> Esquema de la elaboración de la pasta	22
<b>Figura 7.</b> Rotor y estator cónicos, con ranuras en la periferia	22
<b>Figura 8.</b> Foto que ilustra las partes del secador utilizado en el proceso de secado	24
<b>Figura 9.</b> Esquema experimental para la determinación de la X, mH <sub>2</sub> O y la N	26
<b>Figura 10.</b> Diagrama de Flujo ANSI del algoritmo de cálculo de la temperatura de la superficie de secado	31
<b>Figura 11.</b> Resistencias que afectan la transferencia de calor en el proceso de secado	32
<b>Figura 12.</b> Diagrama de Cálculo del dimensionamiento del secador de doble tambor Parámetro de entrada: Flujo másico de producción	34
<b>Figura 13.</b> Diagrama de Cálculo del dimensionamiento del secador de doble tambor Parámetro de entrada: Flujo másico del agua evaporada	35
<b>Figura 14.</b> Variación de la humedad final en función de la temperatura del vapor: V <sub>rc</sub> =6 rpm; b=0,20 mm	41
<b>Figura 15.</b> Variación de la humedad final en función de la separación entre tambores: V <sub>rc</sub> =6 rpm; P <sub>v</sub> =60 psig	42
<b>Figura 16.</b> Variación de la humedad final media en función de la velocidad de rotación de los tambores: P <sub>v</sub> = 60 psig; b=0,20 mm	43
<b>Figura 17.</b> Flujo másico del agua evaporada en función de la temperatura del vapor: V <sub>rc</sub> =6 rpm; b=0,20 mm	44
<b>Figura 18.</b> Flujo másico del agua evaporada en función de la separación entre tambores: V <sub>rc</sub> =6 rpm; P <sub>v</sub> =60 psig	45
<b>Figura 19.</b> Flujo másico del agua evaporada en función de la velocidad de rotación: P <sub>v</sub> = 60 psig; b=0,20 mm	46
<b>Figura 20.</b> Velocidad de evaporación del agua en función de la temperatura del vapor: V <sub>rc</sub> =6 rpm; b=0,20 mm	47
<b>Figura 21.</b> Velocidad de evaporación del agua en función de la separación entre tambores: V <sub>rc</sub> =6 rpm; P <sub>v</sub> =60 psig	48



<b>Figura 22.</b>	Velocidad de evaporación del agua en función de la velocidad de rotación: $P_v = 60$ psig; $b=0,20$ mm	49
<b>Figura 23.</b>	Velocidad de evaporación del agua en función de la temperatura del vapor $V_{rc}=6$ rpm; $b=0,20$ mm	52
<b>Figura 24.</b>	Velocidad de evaporación del agua en función de la separación entre tambores: $V_{rc}=6$ rpm; $P_v=60$ psig	53
<b>Figura 25.</b>	Velocidad de evaporación del agua en función de la velocidad de rotación: $P_v = 60$ psig; $b=0,20$ mm	54
<b>Figura 26.</b>	Temperatura de la superficie de secado en función de la temperatura del vapor: $V_{rc}=6$ rpm; $b=0,20$ mm	55
<b>Figura 27.</b>	Temperatura de la superficie de secado en función de la separación entre tambores: $V_{rc}=6$ rpm; $P_v=60$ psig	56
<b>Figura 28.</b>	Temperatura de la superficie de secado en función de la velocidad de rotación: $P_v = 60$ psig; $b=0,20$ mm	57
<b>Figura 29.</b>	Flujo másico del agua evaporada en función de la temperatura del vapor: $V_{rc}=6$ rpm; $b=0,20$ mm	59
<b>Figura 30.</b>	Flujo másico del agua evaporada en función de la separación entre tambores: $V_{rc}=6$ rpm; $P_v=60$ psig	59
<b>Figura 31.</b>	Flujo másico del agua evaporada en función de la velocidad de rotación: $P_v = 60$ psig; $b=0,20$ mm	60
<b>Figura 32.</b>	Flujo másico de producción en función de la temperatura del vapor: $V_{rc}=6$ rpm; $b=0,20$ mm	61
<b>Figura 33.</b>	Flujo másico de producción en función de la separación entre tambores: $V_{rc}=6$ rpm; $P_v=60$ psig	62
<b>Figura 34.</b>	Flujo másico de producción en función de la velocidad de rotación: $P_v = 60$ psig; $b=0,20$ mm	62
<b>Figura 35.</b>	Área de la película deshidratada en función de la temperatura del vapor: $V_{rc}=6$ rpm; $b=0,20$ mm	64
<b>Figura 36.</b>	Área de la película deshidratada en función de la separación entre tambores: $V_{rc}=6$ rpm; $P_v=60$ psig	64
<b>Figura 37.</b>	Área de la película deshidratada en función de la velocidad de rotación: $P_v = 60$ psig; $b=0,20$ mm	65
<b>Figura 38.</b>	Área nominal de los tambores en función de la temperatura del vapor: $V_{rc}=6$ rpm; $b=0,20$ mm	66
<b>Figura 39.</b>	Área nominal de los tambores en función de la separación entre tambores: $V_{rc}=6$ rpm; $P_v=60$ psig	67
<b>Figura 40.</b>	Área nominal de los tambores en función de la velocidad de rotación: $P_v = 60$ psig; $b=0,20$ mm	67
<b>Figura 41.</b>	Consumo de vapor específico en función de la temperatura del vapor : $V_{rc}=6$ rpm; $b=0,20$ mm	76

<b>Figura 42.</b>	Consumo de vapor específico en función de la separación entre tambores: $V_{rc}=6$ rpm; $P_v=60$ psig	76
<b>Figura 43.</b>	Consumo de vapor específico en función de la velocidad de rotación: $P_v = 60$ psig; $b=0,20$ mm	77
<b>Figura 44.</b>	Velocidad de producción en función de la temperatura del vapor: $V_{rc}=6$ rpm; $b=0,20$ mm	78
<b>Figura 45.</b>	Velocidad de producción en función de la separación entre tambores: $V_{rc}=6$ rpm; $P_v=60$ psig	79
<b>Figura 46.</b>	Velocidad de producción en función de la velocidad de rotación: $P_v = 60$ psig; $b=0,20$ mm	80
<b>Figura 47.</b>	Grado de madurez según Von Loesecke	87
<b>Figura 48.</b>	Área efectiva y área libre del secador de doble tambor	90
<b>Figura 49.</b>	Programación de la pantalla principal (SETA I)	130
<b>Figura 50.</b>	Lazo de la programación (pantalla principal y segunda pantalla, SETA I)	131
<b>Figura 51.</b>	Subrutina del Botón "Limpiar" (SETA I)	132
<b>Figura 52.</b>	Subrutina del Botón "Restablecer" (SETA I)	132
<b>Figura 53.</b>	Subrutina del Botón "Resultados" y subrutina de los algoritmos (SETA I)	133
<b>Figura 54.</b>	Subrutina del cuadro de referencia de secadores comerciales (SETA I)	134
<b>Figura 55.</b>	Programación de la pantalla principal (SETA II)	135
<b>Figura 56.</b>	Lazo de la programación (Pantalla principal y Segunda pantalla, SETA II)	136
<b>Figura 57.</b>	Subrutina del Botón "Limpiar" (SETA II)	137
<b>Figura 58.</b>	Subrutina del Botón "Restablecer" (SETA II)	137
<b>Figura 59.</b>	Subrutina del Botón "Resultados" y subrutina de los algoritmos (SETA II)	138
<b>Figura 60.</b>	Subrutina del cuadro de referencia de secadores comerciales (SETA II)	139

## ÍNDICE DE ANEXOS

	<b>PÁGINA</b>
<b>ANEXO I</b> Escala de madurez del banano	88
<b>ANEXO II</b> Ejemplo de cálculo	89
<b>ANEXO III</b> Tabla de resultados	104
<b>ANEXO IV</b> Diagramas de la programación	131
<b>ANEXO V</b> Manual del Usuario	141

## RESUMEN

El presente Proyecto de Titulación abordó el desarrollo de dos programas SETA I Y SETA II, escritos en Visual Basic 6.0™, y permiten obtener las dimensiones de un secador continuo de doble tambor.

Para acopiar datos para el desarrollo de los programas, durante el desarrollo del proyecto se realizaron pruebas experimentales de secado en las que se alimentó pasta de banano al secador en lotes de 0,800 kg (modalidad semi-batch) para establecer la influencia de la presión del vapor saturado, de la velocidad de rotación de los tambores, y de la separación entre ellos; sobre la humedad final, el flujo másico y la velocidad de evaporación del agua.

Para preparar la pasta, se caracterizó el banano respecto de su color externo, humedad inicial y sólidos solubles.

Además del estudio de la influencia entre las variables citadas, las pruebas de deshidratación permitieron estimar los coeficientes de transferencia de calor, la velocidad del aire circundante, la humedad final, y los flujos másicos que se utilizaron en los programas.

Para el diseño de SETA I y SETA II se desarrollaron dos algoritmos.

El primero, fue propuesto por Guerra, 2008, sobre la base de las ecuaciones de diseño formuladas por Okos *et al.*, 1992, permite la estimación de la temperatura de la superficie de secado por iteración, y la consecuente estimación de la velocidad de evaporación del agua.

Y el segundo, permite estimar el área nominal del secador sobre la base del área de la película deshidratada y un factor de área, que relaciona el número de revoluciones necesarias para secar el lote alimentado en cada experimento con el ángulo subtendido entre el punto de formación de la película que se seca y el punto en que se desprende del secador, que se denomina ángulo de contacto. La longitud y el diámetro del secador se estiman en este algoritmo a partir del área nominal y de la relación longitud/diámetro del secador utilizado en los experimentos.

En todos los casos los resultados experimentales se compararon con los resultados estimados por los programas mediante el cálculo de las variaciones porcentuales relativas; y por medio de pruebas de hipótesis para muestras

pequeñas, que consistieron en establecer la diferencia entre las medias aritméticas de las áreas nominales calculadas por los programas y el área nominal real, llegándose a establecer que no hubo diferencias significativas entre ellas; mediante la significación del estadígrafo t de Student.

Para comprobar la idoneidad del programa SETA II, éste se ejecutó utilizando flujos máxicos de agua evaporada obtenidos de secadores comerciales industriales de doble tambor, comparándose los resultados así obtenidos por los programas con las dimensiones de secadores industriales mediante la variación porcentual relativa, pudiéndose concluir que el programa obtiene aproximaciones razonables a los secadores industriales.

## INTRODUCCIÓN

Los secadores de tambor o de rodillos se desarrollaron al comienzo del siglo XX, habiéndoselos utilizado desde esa época hasta antes de la invención del secado por aspersion (Spray Drying), para secar casi todos los alimentos líquidos (Tang *et al.*, 2003).

En la actualidad, el secado en secadores de tambor o rodillos es uno de los métodos más eficientes en términos de consumo de energía, y uno de los más adecuados, para el secado de líquidos de alta viscosidad, o de alimentos en forma de puré (Drum Drying Resources, 2009).

Además, estos secadores son particularmente convenientes para productos termosensibles porque permiten un secado a presión reducida y a baja temperatura durante un corto tiempo (Nonhebel, 1979).

Estos secadores se emplean mundialmente debido a su capacidad para manejar un amplio rango de productos tales como pegamentos, aglomerantes, emulsificantes, lácteos, alimentos para bebé, cereales para el desayuno, pulpas de frutas y vegetales, puré de papa, almidones cocidos y levaduras (Tang *et al.*, 2003).

Todos los productos de estos secadores tienen buena porosidad y por consiguiente, buena rehidratación, que son cualidades muy importantes para la fácil reconstitución de productos tales como el puré de papas, cualidades que se deben a la característica evaporación del agua por ebullición que se produce en estos secadores, (Rodriguez, 1995).

Estas características hacen que el secador de doble tambor sea un equipo recomendable para el procesamiento de alimentos, cuyo diseño y construcción se facilitará con el uso de los programas que se han creado en el contexto de este Proyecto de Titulación.

A este respecto es pertinente citar que, en los últimos 30 años se han realizado esfuerzos considerables por desarrollar programas computacionales aplicables a los procesos de secado; y que - sin embargo- pocos han sido los paquetes computacionales comerciales relacionados con el secado y con el diseño de sistemas de secado que han sido aceptados satisfactoriamente por la industria (Gong y Mujumdar, 2008).

Por las razones mencionadas, se presume que la disponibilidad de un programa para el dimensionamiento de secadores de doble tambor podría ser de utilidad para la industria alimentaria ecuatoriana la que no sólo dispondrá de una herramienta de dimensionamiento para el diseño de detalle y para la construcción de este tipo de secadores, sino que –además- contará con una herramienta idónea para su evaluación.

## NOMENCLATURA

<b>Símbolo</b>	<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>
$A_t$	Área nominal de los tambores del secador (área total)	$m^2$
$A_c$	Área efectiva de los tambores del secador desde el punto de alimentación hasta el desprendimiento del producto seco (ángulo de contacto $208^\circ$ )	$m^2$
$A_l$	Área libre de los tambores del secador, área que no se encuentran en contacto con la película deshidratada	$m^2$
$A_h$	Área de la película de banano deshidratada	$m^2$
$b$	Separación entre los tambores del secador	mm
$C_m$	Margen de Corrosión	pulg
$C_p$	Calor específico a presión constante del elemento volumétrico	J/kg °C
$C_{p_w}$	Calor específico del agua	J/kg °C
$CV$	Consumo de vapor específico	kg vapor/kg H <sub>2</sub> O evaporada
$d$	Espesor de la película	m
$D$	Diámetro externo del tambor	m
$D_e$	Diámetro externo del tambor	m
$D_i$	Diámetro interno del tambor	m
$D_{we}$	Difusividad del elemento volumétrico	$m^2/s$
$dd$	Espesor de la pared del tambor	m
$\frac{dQ}{dt}$	Velocidad instantánea de suministro de calor	kJ/h
$\frac{dX}{dt}$	Pérdida de la humedad por unidad de tiempo	kg/kg sólido seco h
$E_1$	Tamaño de la muestra 1	
$E_2$	Tamaño de la muestra 2	
$f$	Relación longitud/diámetro	



<b>g</b>	Constante gravitacional	$\text{m/s}^2$
<b><math>G_r</math></b>	Número de Grashof	
<b>h</b>	Coefficiente de transferencia de calor por convección del aire (área en contacto con la película de banano)	$\text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$
<b><math>h_{\text{air}}</math></b>	Coefficiente de transferencia de calor por convección del aire	$\text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$
<b><math>h_e</math></b>	Coefficiente de transferencia de calor por evaporación desde la superficie	$\text{kJ/h m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$
<b><math>h_f</math></b>	Coefficiente de transferencia de calor debido al contacto entre la pared del secador y la película del material a secar	$\text{kJ/h m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$
<b><math>h_l</math></b>	Coefficiente de transferencia de calor por convección del aire (área en contacto con el aire)	
<b><math>h_m</math></b>	Coefficiente de transferencia de calor por conducción a través de la pared metálica	$\text{kJ/h m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$
<b><math>h_p</math></b>	Coefficiente de transferencia de calor por conducción a través de la película deshidratada	$\text{kJ/h m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$
<b><math>h_r</math></b>	Coefficiente de transferencia de calor por radiación	$\text{kJ/h m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$
<b><math>h_w</math></b>	Coefficiente de transferencia de calor por condensación	$\text{kJ/h m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$
<b>k</b>	Conductividad térmica del elemento volumétrico	$\text{W/m } ^\circ\text{C}$
<b><math>k_a</math></b>	Conductividad térmica del aire	
<b><math>k_c</math></b>	Conductividad térmica del condensado a la temperatura de película	$\text{W/m } ^\circ\text{C}$
<b><math>K_c</math></b>	Coefficiente de transferencia de calor por conducción	$\text{kJ/h m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$
<b><math>k_d</math></b>	Conductividad térmica de la pared del tambor	$\text{W/m } ^\circ\text{C}$
<b><math>K_G</math></b>	Coefficiente de transferencia de masa	$\text{mol/m}^2 \text{ s atm}$
<b><math>k_m</math></b>	Conductividad térmica de la pared del tambor	$\text{kJ/m h } ^\circ\text{C}$
<b><math>k_p</math></b>	Conductividad térmica de la película deshidratada	$\text{kJ/m h } ^\circ\text{C}$
<b>L</b>	Longitud del tambor	m
<b>m</b>	Número de revoluciones de los tambores del secador, según el ángulo de contacto	
<b><math>m_1</math></b>	Masa del crisol tarado vacío	g

<b><math>m_2</math></b>	Masa de la muestra antes del secado	g
<b><math>m_3</math></b>	Masa del crisol más la muestra deshidratada	g
<b><math>m_4</math></b>	Masa de la muestra después del secado	g
<b>M</b>	Peso Molecular de la humedad	g/mol
<b><math>\dot{m}_{H_2O}</math></b>	Flujo másico del agua evaporada	kg H <sub>2</sub> O/h
<b><math>\dot{m}_{H_2Oin}</math></b>	Flujo másico del agua en la pasta antes de la deshidratación	kg H <sub>2</sub> O/h
<b><math>\dot{m}_{H_2Of}</math></b>	Flujo másico del agua en la película formada después de la deshidratación	kg H <sub>2</sub> O/h
<b><math>\dot{m}_p</math></b>	Flujo másico de producto deshidratado	kg producto deshidratado/h
<b><math>\dot{m}_{pa}</math></b>	Velocidad de producción	kg producto deshidratado/h m <sup>2</sup>
<b><math>\dot{m}_v</math></b>	Flujo másico del vapor o consumo de vapor	kg vapor/h
<b>n</b>	Tamaño de las muestras	
<b>N</b>	Velocidad de secado o velocidad de evaporación del agua por m <sup>2</sup>	kg H <sub>2</sub> O/h m <sup>2</sup>
<b>OC</b>	Ángulo de contacto desde el punto de alimentación hasta la cuchilla que desprende el producto seco	°
<b>P</b>	Presión de Diseño	lb/pulg <sup>2</sup>
<b><math>P_s</math></b>	Presión de saturación a la T del elemento	atm
<b><math>P_v^*</math></b>	Presión de vapor a la temperatura de la superficie del producto	mmHg
<b><math>P_w</math></b>	Presión parcial de saturación a la temperatura del aire	atm
<b><math>P_{va}</math></b>	Presión parcial de saturación a la temperatura del aire	mmHg
<b>q</b>	Calor total	kJ/h
<b>Q</b>	Calor	kJ/h
<b>R</b>	Constante universal de los gases	J/kgmol °C
<b><math>R_1</math></b>	Radio interno del tambor	m
<b><math>R_2</math></b>	Radio externo del tambor incluido el espesor de la película deshidratada	m

<b>R<sub>s</sub></b>	Radio externo del tambor	
<b>s</b>	Desviación típica muestral	
<b>S<sub>2</sub></b>	Esfuerzo máximo permisible	lb/pulg <sup>2</sup>
<b>S<sub>S</sub></b>	Masa del sólido seco	kg
<b>T</b>	Temperatura de la película	°C
<b>t</b>	Tiempo	s
<b>T<sub>a</sub></b>	Temperatura del aire circundante; Promedio 18 °C, Quito	°C
<b>T<sub>air</sub></b>	Temperatura del aire circundante	°C
<b>T<sub>b</sub></b>	Temperatura de ebullición del líquido, Quito = 91,2 °C	°C
<b>t<sub>c</sub></b>	Coefficiente de confianza o valor crítico t de student, utilizado en la diferencia de medias para pequeñas muestras	
<b>T<sub>B</sub></b>	Temperatura interna del tambor	°C
<b>t<sub>e</sub></b>	Estadístico de student para muestras pequeñas	
<b>T<sub>i</sub></b>	Temperatura de la pared del tambor interna	
<b>t<sub>m</sub></b>	Espesor de la pared del tambor del secador	m
<b>t<sub>p</sub></b>	Espesor de la película deshidratada	m
<b>T<sub>r</sub></b>	Temperatura reducida	
<b>t<sub>s</sub></b>	Tiempo de secado	min
<b>T<sub>sat</sub></b>	Temperatura de saturación	°C
<b>T<sub>s</sub></b>	Temperatura de la pared del tambor externa	°C
<b>T<sub>ss</sub></b>	Temperatura de la superficie de secado	°C
<b>T<sub>ssl</sub></b>	Temperatura de la superficie de secado interna	°C
<b>T<sub>v</sub></b>	Temperatura del vapor	°C
<b>T<sub>∞</sub></b>	Temperatura del aire circundante; Promedio 18 °C, Quito	°C
<b>U</b>	Coefficiente total de transferencia de calor	kJ/h m <sup>2</sup> °C
<b>U<sub>m</sub></b>	Coefficiente medio total de transferencia de calor	kJ/h m <sup>2</sup> °C
<b>v</b>	Velocidad del aire circundante	m/s

<b>Vrc</b>	Velocidad de rotación de los rodillos	rpm
<b>X</b>	Contenido de humedad	kg agua/kg sólido seco
<b>Xc</b>	Contenido de humedad crítico	kg agua/kg sólido seco
<b>Xf</b>	Contenido de humedad final de la película deshidratada	kg agua/kg sólido seco
<b>Xi</b>	Contenido de humedad inicial en la pasta	kg agua/kg sólido seco
<b>z</b>	Número de pruebas realizadas	

<b>Símbolo</b>	<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>
<b><math>\alpha</math></b>	Porcentaje de sólidos	%
<b><math>\beta</math></b>	Coefficiente de dilatación volumétrica	$^{\circ}\text{K}^{-1}$
<b><math>\Delta P</math></b>	Diferencia de presiones entre $P_{sp}-P_{wa}$	mmHg
<b><math>\Delta T</math></b>	Diferencia de temperaturas entre $T_v-T_a$	$^{\circ}\text{C}$
<b><math>\Delta T_a</math></b>	Diferencia de temperaturas entre $T_p-T_a$	$^{\circ}\text{C}$
<b><math>\Delta t_f</math></b>	Diferencia de temperaturas entre $T_{ss}-T_a$	$^{\circ}\text{C}$
<b><math>\varepsilon</math></b>	Factor de corrección de la velocidad de secado instantánea	
<b><math>\lambda</math></b>	Calor latente de vaporización en la superficie de secado, a la temperatura de saturación	kJ/kg
<b><math>\lambda_v</math></b>	Calor latente de vaporización a la presión del vapor establecida	kJ/kg
<b><math>\rho</math></b>	Densidad de la película sobre el tambor	$\text{kg}/\text{m}^3$
<b><math>\rho_a</math></b>	Densidad del aire	$\text{kg}/\text{m}^3$
<b><math>\rho_c</math></b>	Densidad del condensado	$\text{kg}/\text{m}^3$
<b><math>\rho_v</math></b>	Densidad del vapor a la temperatura de saturación	$\text{kg}/\text{m}^3$
<b><math>\sigma</math></b>	Desviación típica de una población	
<b><math>\mu_c</math></b>	Viscosidad del condensado	Kg/ms

$\mu_a$	Viscosidad del aire	Kg/ms
$\theta$	Posición angular	rad
$\nu$	Grados de Libertad	

# 1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

## 1.1 SECADO POR CONTACTO

### 1.1.1 GENERALIDADES

Las tecnologías de secado están principalmente caracterizadas por la manera en la que el producto húmedo se relaciona con el medio de secado. Los métodos empleados en el secado de los alimentos pueden clasificarse de la siguiente manera (Brennan *et al.*, 1998; Vanaclocha y Requena, 2003):

- a) *Secado por aire caliente*: El alimento se pone en contacto con una corriente de aire caliente, la que, además de proporcionarle el calor necesario para la vaporización del agua, actúa también como gas portador, para eliminar el vapor formado.
- b) *Secado por contacto directo con una superficie caliente*: En este tipo de secado la transmisión de calor hasta el producto húmedo tiene lugar por conducción.
- c) *Secado mediante el aporte de energía por una fuente radiante de microondas o dieléctrica*.
- d) *Liofilización*: El agua de los alimentos se congela y se sublima.

### 1.1.2 SECADO POR CONTACTO CON UNA SUPERFICIE CALIENTE

#### 1.1.2.1 Principios generales

Los secadores indirectos, llamados también secadores por contacto emplean principios de operación similares a los de los secadores directos (Traub, 2006).

Sin embargo, la diferencia fundamental entre estos secadores es el método de transferencia de calor, pues en los secadores por contacto el calor sensible y el calor latente de vaporización se aportan al producto húmedo por conducción a través de superficies calentadas (en reposo o en movimiento), constituidas generalmente por paredes metálicas, que al calentarse transfieren el calor al alimento para evaporar el líquido (Mujumdar y Menon, 1995).

Existen beneficios substanciales que se derivan del uso de estos secadores que se detallan a continuación (Oakley, 1997; Helland y Muri, 2007):

- *Permiten que se ejecute secado al vacío*, lo que es ideal para materiales termosensibles o productos fácilmente oxidables, como productos alimenticios; pues el secado puede llevarse a cabo a bajas temperaturas, y aumentar la diferencia de temperatura entre el medio calefactor y el sólido.
- *Apropiados para el secado de productos finos o sólidos muy húmedos*, ya sean líquidos pastosos o viscosos.
- *Adecuados para manejar materiales inflamables y explosivos*, como es el caso de la recuperación de solventes, por ejemplo, debido a que, por los bajos volúmenes requeridos, es fácil mantener atmósferas inertes de nitrógeno.
- *Generalmente económicos*, porque utilizan fluidos condensables como medios de calentamiento, aprovechándose el calor latente de los mismos, y también porque se les abastece de acuerdo al requerimiento del material a secar.

En los secadores por contacto, el proceso de secado es esencialmente una evaporación y el sólido tiende a adquirir la temperatura de ebullición del líquido y a mantenerla. Al final del secado el sólido se sobrecalienta, y la temperatura aumenta por encima de la temperatura de ebullición del líquido, debido a que el secado comienza a ser controlado por la velocidad de eliminación del agua desde el sólido. Éste es en general, un efecto secundario y puede ser incluido en el coeficiente total de transferencia de calor, al que se denominará como coeficiente total de secado por conducción (Nonhebel y Moss, 1979) que se explicará en el numeral 1.1.2.5.

### 1.1.2.2 Tipos de secadores por contacto

Existe una amplia variedad de secadores por contacto cuyos diseños dependen del material que se desea secar, ya que éste puede ser líquido o sólido. Para estos fines, los productos a secar, y los secadores, pueden ser divididos como se muestra en la tabla 1 (Oakley, 1997):

**Tabla 1.** Tipos de secadores por contacto

Tipo de Secador	Continuo o por paradas	Atmosférico o al vacío	Producto	Aplicaciones típicas
Bandejas en vacío	Por paradas	Vacío	Cualquiera	Trozos de frutas, extractos de carnes y vegetales
Banda a vacío	Continuo	Vacío	Pastas, sólidos	Migas de chocolate, extractos de carnes y vegetales, jugos de frutas
Tambor	Continuo	Atmosférico o vacío	Líquidos	Alimento de bebé, jarabe de maíz
Rotatorio indirecto	Continuo	Atmosférico	Sólidos de flujo libre	Almidón, granos de cebada
Con agitación horizontal	Por paradas o continuo	Atmosférico o vacío	Líquidos, pastas, polvos	Migas de chocolate, harina de maíz
Con agitación vertical	Por paradas	Atmosférico o vacío	Líquidos, pastas, polvos	Extractos de plantas, colorantes de alimentos, glucosa, almidón

Oakley, 1997

### 1.1.2.3 Transferencia de calor

Para el caso típico de un sólido húmedo introducido en un recipiente cerrado calentado externamente y que está provisto de medios para retirar el vapor, la velocidad de secado en un instante dado va a depender del aporte de calor al material (Nonhebel y Moss, 1979; Oakley, 1997). Por lo tanto:

$$S_s \left( \frac{dX}{dt} \right) \lambda = - \left( \frac{dQ}{dt} \right) \quad [1]$$

La velocidad de suministro de calor depende a su vez de la diferencia de temperaturas entre la fuente de calentamiento y el producto, del área de secado y del coeficiente total de transferencia de calor.



En este caso:

$$\left(\frac{dQ}{dt}\right) = -UA_h(T_{ss} - T_v) \quad [2]$$

Reemplazando la ecuación 2 en la ecuación 1, se obtiene la siguiente ecuación:

$$S_s \left(\frac{dX}{dt}\right) \lambda = -\left(\frac{dQ}{dt}\right) = UA_h(T_{ss} - T_v) = -UA_h(T_v - T_{ss}) \quad [3]$$

#### 1.1.2.4 Temperatura de la superficie

Si se considera la temperatura en la superficie de evaporación  $T_{ss}$ , se puede estimar el coeficiente total de transferencia de calor en función de las resistencias de las distintas películas (Nonhebel y Moss, 1979; Oakley, 1997). Entonces:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_w} + \frac{1}{h_m} + \frac{1}{h_f} + \frac{1}{h_p} + \frac{1}{h_e} \quad [4]$$

Donde:

$$h_m = \frac{k_m}{t_m} \quad [5]$$

$$h_p = \frac{k_p}{t_p} \quad [6]$$

En general, el efecto de  $h_w$ ,  $h_m$ , y  $h_e$  sobre la transferencia de calor es pequeño, debido a que los valores típicos de estos coeficientes peliculares son altos, por lo que pueden despreciarse, reduciéndose la ecuación 4 a la siguiente expresión:

$$\frac{1}{U_m} = \frac{1}{h_f} + \frac{1}{h_p} \quad [7]$$

Sobre la base de lo enunciado anteriormente, es común tomar la temperatura de la pared del secador como la temperatura del medio calefactor y la temperatura de la superficie en la cual se produce la evaporación como la temperatura de ebullición del líquido por lo que la ecuación 3 puede simplificarse para obtener la siguiente expresión:

$$S_s \left( \frac{dX}{dt} \right) = \frac{-U_m A_h (T_v - T_b)}{\lambda} \quad [8]$$

### 1.1.2.5 Coeficiente de secado por conducción

Sin embargo, la ecuación 8 no puede aplicarse sobre todo el ciclo de secado, pues al final del secado el sólido se recalienta y la temperatura de su superficie será superior a la temperatura de ebullición. Por esto la diferencia promedio sobre el ciclo total de secado entre las temperaturas será un poco menor que  $T_v - T_b$  (Nonhebel y Moss, 1979), lo que se puede expresar mediante la expresión siguiente:

$$T_v - T_{ss} = a(T_v - T_b) \quad [9]$$

Al aplicar esta diferencia de temperaturas, la ecuación 8 se modifica, y se obtiene:

$$S_s \left( \frac{dX}{dt} \right) = \frac{-a U_m A_h (T_v - T_b)}{\lambda} \quad [10]$$

El valor de  $(aU_m)$  referido al ciclo completo de secado será prácticamente constante para un aparato y material dado; y a este grupo se le puede considerar como un coeficiente de secado por conducción  $K_c$  por lo que la ecuación de la velocidad de secado por conducción se puede expresar de la siguiente manera:

$$N = \frac{S_s}{A_h} \left( - \frac{dX}{dt} \right) = \frac{K_c (T_v - T_b)}{\lambda} \quad [11]$$

Donde, si se reemplaza  $dX/dt$  por  $\Delta X/\Delta t$ , se puede escribir:

$$N = \frac{K_c(T_v - T_b)}{\lambda} = \frac{(X_i - X_f)S_s}{A_h t_s} \quad [12]$$

La ecuación 12 se considera una ecuación general para el fenómeno de secado por conducción, que se puede usar para relacionar el coeficiente de secado con la humedad inicial para determinar cierta humedad final, o viceversa. También se la puede emplear para correlacionar datos obtenidos en un secador dado, entre límites de humedad prefijados (Nonhebel y Moss, 1979).

## 1.2 SECADORES DE TAMBOR

### 1.2.1 INTRODUCCIÓN

El secado en secadores de tambor, el slurry, pasta o puré se aplica en forma de una capa delgada sobre la superficie externa del tambor rotatorio. En estos secadores el producto seco que resulta es removido por medio de una cuchilla estática aproximadamente  $\frac{3}{4}$  de revolución después del punto de aplicación de la pasta (Tang *et al.*, 2003; Jayaraman y Gupta, 1995).

### 1.2.2 DESCRIPCIÓN DEL SECADOR DE TAMBOR

Los secadores de tambor están constituidos por uno o dos cilindros metálicos huecos montados sobre ejes horizontales rotativos. La pared del secador se calienta debido a la condensación del vapor en el interior del tambor. En estos secadores, el calor atraviesa la pared metálica del tambor hasta llegar a la delgada capa de material extendida sobre su superficie externa (Lecompte *et al.*, 2004; Kostoglou *et al.*, 2003).

El equipo auxiliar del secador normalmente está constituido por cuchillas, una campana con tiro para eliminar el vapor de agua y el polvo, transportadores y vertederos para el polvo seco, un tanque de alimentación, una bandeja de alimentación y un tanque de recirculación (Tang *et al.*, 2003).

Para una operación normal que no implique problemas de corrosión o aspectos especiales respecto a la calidad del producto, los tambores se fabrican de acero con recubrimiento de cromo. Cuando el producto es levemente ácido o cuando debe reducirse a un mínimo la contaminación del producto se emplean tambores de bronce, aunque, si se trabaja con esta aleación relativamente blanda, debe prestarse mucha atención a la ubicación de la cuchilla y a su mantenimiento (Nonhebel y Moss, 1979).

Empresas comerciales como Buflovak diseñan y fabrican los tambores del secador de acuerdo al código A.S.M.E., Sección VIII, División 1; para 160 psig de presión máxima de vapor (Buflovak, 2004).

En la tabla 2 se recopilan las dimensiones y las variables de operación más frecuentes de un secador de tambor.

**Tabla 2.** Variables de operación y dimensiones más frecuentes de un secador de tambor

<b>Diámetro (m)</b>	0,5-1,5
<b>Longitud (m)</b>	1,0-3,0
<b>Espesor del tambor (mm)</b>	20-40
<b>Espesor Inicial del Producto (mm)</b>	0,1-2,0
<b>Velocidad de rotación (rpm)</b>	5,0-30
<b>Temperatura del Vapor (°C)</b>	120-162
<b>Presión del Vapor (psig)</b>	29-100
<b>Consumo de Energía (KJ/Kg H<sub>2</sub>O removida)</b>	3 000-3 500
<b>Consumo de Vapor (Kg/Kg H<sub>2</sub>O removida)</b>	1,3-1,5
<b>Velocidad de evaporación del agua (Kg/hm<sup>2</sup>)</b>	10-30

Okos *et al.*, 1992

### 1.2.3 CLASIFICACIÓN DE LOS SECADORES DE TAMBOR

Los secadores de tambor se pueden clasificar según el número de tambores, el sentido de giro de los mismos y de acuerdo a disposiciones de alimentación, como se presenta en la tabla 3 (Nonhebel y Moss, 1979).

**Tabla 3.** Clasificación de los secadores de tambor

Tipo de Secador	Tipo de Alimentación	Modo de Operación	Aplicación
De un solo tambor	Por inmersión Por rociado Por rodillo de alimentación Por vertedero	A presión atmosférica, A vacío	Pastas pegajosas o productos que forman terrones duros al secarse, gelatina, almidón
De tambores gemelos	Por inmersión Por rociado Por vertedero	A presión atmosférica, A vacío	Soluciones con viscosidad de 20 cP y de concentraciones del 40% en peso
De doble tambor	Por vertedero	A presión atmosférica, A vacío	Leche, suero, soluciones diluidas, soluciones concentradas, cereales para bebé, polvos de frutas secas

Nonhebel y Moss, 1979

Para productos termosensibles se puede usar secadores de tambor a vacío para reducir la temperatura de ebullición del líquido, y aumentar así la diferencia de temperatura entre el medio calefactor y el sólido (Ramli y Daud, 2006).

### 1.2.4 MATERIALES PROCESADOS EN LOS SECADORES DE TAMBOR

En la actualidad, los secadores de tambor se usan en la industria alimenticia y en la industria química para secar una variedad de productos. En la tabla 4 se mencionan algunos productos que se procesan en los secadores de tambor (Gavrielidou, 2002; Supprung y Noomhorm, 2003).

**Tabla 4.** Productos procesados secadores de tambor

<b>Alimentos</b>	Alimentos para bebé Cereales para desayuno Cereales infantiles Copos de patatas Frutas Hortalizas Sal de mar Alimentos para animales Gelatina Levadura
<b>Almidón pre-gelatinizado</b>	Almidón de maíz Almidón de patatas Almidón de tapioca Almidón de arroz Almidón de trigo Almidón nativo
<b>Productos lácteos</b>	Leche en polvo Suero de leche en polvo Leche Caseinato b-lactosa
<b>Aglomerantes y Emulsificantes</b>	Goma arábica Xanteno Alginatos Lecitina
<b>Pegamentos</b>	A base de gelatina A base de almidones Sintéticos

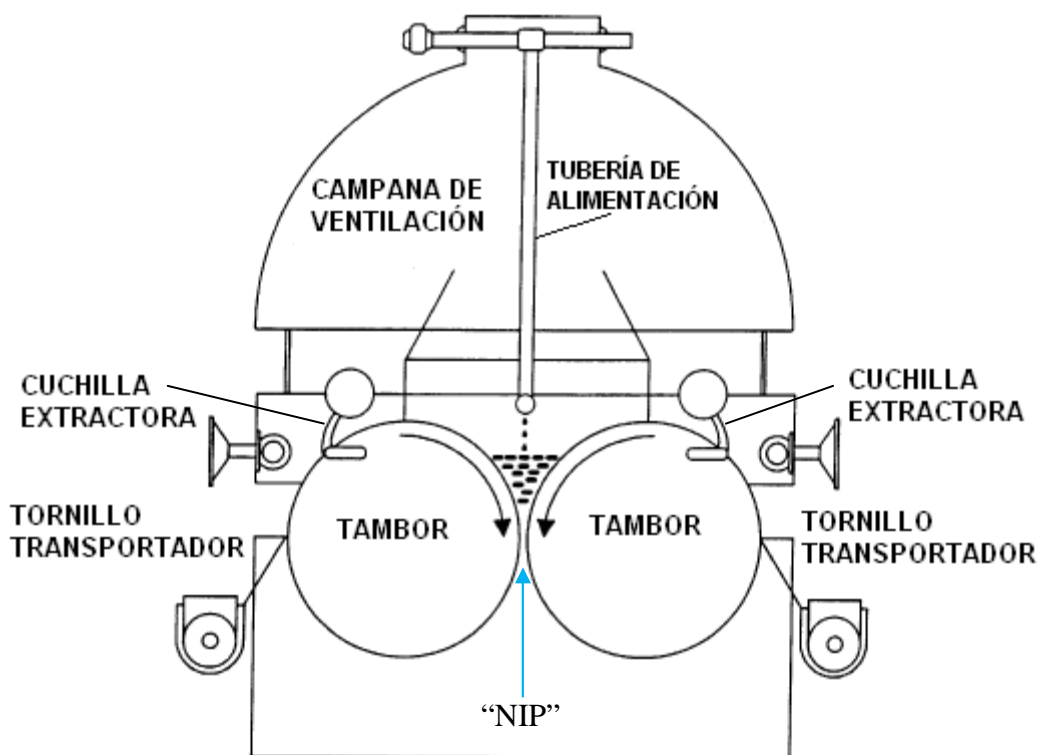
(Gavrielidou, 2002; Supprung y Noomhorm, 2003).

### **Secadores de Doble Tambor**

En este tipo de secador los dos tambores giran en sentido contrario y en dirección al vertedero de alimentación. En estos secadores el espesor de la película queda determinado por el espaciado entre los tambores que el operador establece (Nonhebel y Moss, 1979).

El líquido de alimentación es introducido en el espacio en forma de V formado por la juntura los tambores y cerrado en los extremos mediante tapas que actúan

como represa. Los vapores generados en el proceso de secado se eliminan a través de una campana con tiro forzado montada directamente sobre el secador. En la figura 1 se muestra este tipo de secador (Ramli y Daud, 2006; Treybal, 1988).



**Figura 1.** Secador de doble tambor  
(Okos, 1992)

La mecánica del proceso de secado se describe a continuación (Drum Drying Resources, 2009):

El puré se alimenta al secador a una tasa de flujo controlada, depositándose en el espacio formado por la junta de los dos tambores giratorios calentados mediante vapor.

*La primera fase del proceso de secado ocurre en el puré que se encuentra depositado en el espacio formado por los dos tambores. Al transferirse la energía de los tambores al puré, éste se concentra por ebullición.*

*La segunda fase del proceso de secado* sucede conforme el puré concentrado es depositado como una fina película sobre las superficies de los tambores de secado desde el punto conocido como “NIP”, que es el punto donde los tambores, por su proximidad se “juntan” y casi se tocan entre sí. La película se seca sobre los tambores calientes a medida que estos giran.

*La última etapa del proceso de secado* se completa cuando las cuchillas de extracción, cuya ubicación referencial se puede apreciar en la figura 1, desprenden película deshidratada, la misma que se deposita sobre el sistema que la transporta al siguiente proceso.

### **1.2.5 VARIABLES DE OPERACIÓN DE LOS SECADORES DE TAMBOR**

Hay cuatro variables que están comprendidas en el proceso de secado (Moore, 1995; Kalogianni *et al.*, 2002):

- (a) *Presión de vapor*: o temperatura del medio de calentamiento, que determina la temperatura de la superficie del tambor.
- (b) *Velocidad de rotación de los tambores*: determina el tiempo de contacto entre la película y la superficie caliente de los tambores.
- (c) *Espesor de la película*: que depende del tipo de alimentación del secador, y es regulada por la distancia entre los tambores en el caso de los secadores de doble tambor, y también depende del tipo de alimentación del secador.
- (d) *Condición de alimentación del material*: concentración, características físicas y temperatura a la cual la solución a secar alcanza una temperatura ligeramente superior a su temperatura de ebullición.

## **1.3 MODELOS MATEMÁTICOS DE SECADORES DE TAMBOR**

### **1.3.1 INTRODUCCIÓN**

El secado es un proceso involucra la transferencia simultánea de calor y masa. Por esto uno de los objetivos para simular un proceso de este tipo puede ser el es



estimar la distribución de la temperatura y de humedad de la película delgada que se deshidrata sobre la superficie externa del tambor (Kasiri *et al.*, 2004).

Sobre la base de la transferencia de masa y calor se han desarrollado muchos modelos teóricos y semiempíricos de secadores de tambor que han logrado representar en alguna medida los complejos procesos de evaporación de la humedad (Kasiri *et al.*, 2004; Daud y Talib, 2000).

### **1.3.2 MODELOS MATEMÁTICOS DESARROLLADOS**

El modelo teórico de un proceso de secado sobre tambor es esencial para el diseño, optimización y control de los secadores de este tipo. Sin embargo, el modelaje es una tarea difícil pues el secado sobre un tambor es un proceso complejo que requiere de la apropiada integración de los siguientes sub-modelos: (1) Sub-modelo del proceso de secado; (2) Sub-modelo de la dinámica de los fluidos, que tiene que ver con la deposición inicial del material a secar sobre el tambor; (3) Sub-modelo de productos alimenticios viscosos, que depende de las condiciones de alimentación del material a secar (contenido de humedad, propiedades termofísicas, etc.); y (4) Sub-modelo de la transferencia de calor, que tiene que ver con la conducción del calor a través de la pared del tambor y a través de la película que se deshidrata; (Kostoglou, 2003; Islam, 2007).

A pesar de que se han realizado extensivos estudios experimentales y teóricos para tratar de optimizar el diseño, y el escogimiento de las variables de operación asociadas con los secadores de tambor, el diseño de estos secadores para obtener productos deshidratados de adecuada calidad, con mínimos consumos de energía, y máximos rendimientos, todavía constituye un desafío porque, además de lo mencionado, se debe tomar en cuenta que las principales variables que necesitan definirse dependen principalmente del tipo de producto que se quiera deshidratar, y de los parámetros de calidad de los productos finales que deseen obtenerse, como son, por ejemplo, la humedad final, y las propiedades organolépticas (Islam, 2007).

En este sentido las variables más importantes del secado de un secador de doble tambor son, además de las ya citadas, la altura de alimentación; y las condiciones de alimentación del material a secar, como: la concentración y la temperatura; además de las características físicas como la viscosidad; y la temperatura con la cual llega el material a la superficie del tambor (Gavrielidou, 2001).

Se han publicado numerosos estudios sobre secado en secadores de tambor. Entre otros, merecen citarse los siguientes: Drum Dryer Model (Daud and Talib, 2000); Method for the Design of a Contact Dryer-Application to Sludge Treatment in Thin Film Boiling (Lecompte *et al.*, 2004); Design and Control of Drum Dryers for the Food Industry, Part 1. Set-up of a Moisture Sensor and an Inductive Heater (Rodriguez *et al.*, 1995); On the Thermal Inertia of the Wall of a Drum Dryer under a cyclic steady state operation (Kostoglou and Karapantsios, 2003); Heat transport to a starch slurry gelatinizing between the drums of a double drum dryer (Gavrielidou *et al.*, 2002); Mathematical Modeling and Computer Simulation of a Drum Dryer (Kasiri *et al.*, 2004), A Diffusion Model for a Drum Dryer Subjected to Conduction, Convection, and Radiant Heat Input (Islam *et al.*, 2007), Modeling of Drum Drying (Vasseur *et al.*, 1991) y Las Ecuaciones de Diseño para Secadores de Tambor (Okos *et al.*, 1992).

### **1.3.2.1 Mathematical Modeling and Computer Simulation of a Drum Dryer (Modelo Matemático y Simulación en Computador de un Secador de Tambor)**

**Formulado por: Kasiri *et al.*, 2004**

#### ***Conceptualización del Modelo***

El proceso comienza con la cuando el material se deposita en el espacio, o NIP, formado por los tambores, como se puede apreciar en la figura 1.

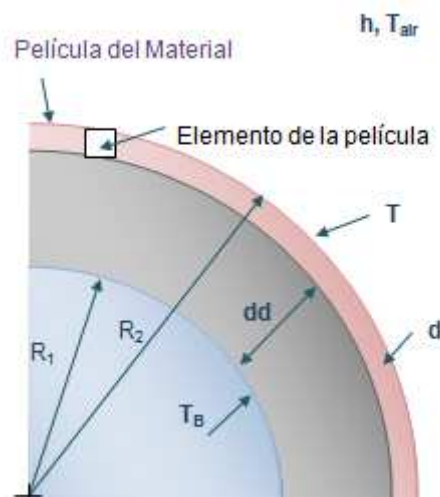
Para el desarrollo de este modelo el proceso de secado se divide en tres segmentos:

- a) *En el primer segmento* el producto alimentado experimenta un incremento de temperatura hasta su punto de ebullición.
- b) *En el segundo segmento* la evaporación se lleva a cabo a la temperatura de ebullición desde la superficie externa.
- c) *En el tercer segmento* el material experimenta un incremento de temperatura paulatino (sobrecalentamiento), desde el punto de ebullición del agua hasta la temperatura del producto final.

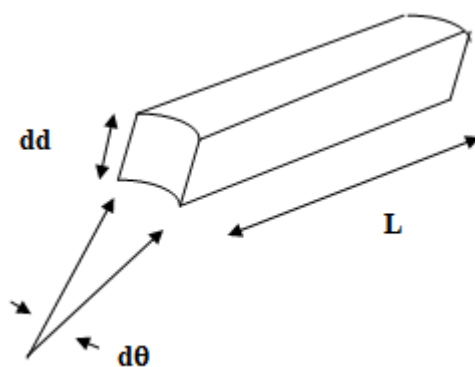
### ***Desarrollo del modelo***

Para fines de ejecución del modelo los autores utilizaron una solución de sulfato de sodio al 20%. Uno de los principales objetivos de llevar a cabo esta simulación fue la estimación de la distribución de la humedad y la temperatura.

El desarrollo de las ecuaciones del modelo considera un elemento volumétrico, como se observa en las figuras 2 y 3.



**Figura 2.** Película del material sobre la superficie del tambor (Kasiri *et al.*, 2004)



**Figura 3.** Elemento volumétrico de la película del material  
(Kasiri *et al.*, 2004)

### ***Balance de Masa***

La ecuación que describe la variación de la velocidad de evaporación respecto de la posición angular es la siguiente:

$$\frac{D_{we} * d * L * \alpha * \rho}{R_2} \frac{d^2 X}{d\theta^2} - \frac{M}{1000} * K_G * R_2 * L * \varepsilon (P^{sat} - P_w) = 2\pi L d R_2 \alpha \rho V_r \frac{dX}{d\theta} \quad [13]$$

Los autores indican que la ecuación 13 es válida para describir la variación de la humedad respecto de  $\theta$  para el segundo y tercer segmentos (evaporación y calentamiento sobre la temperatura de ebullición del agua que se evapora), donde el parámetro  $\varepsilon$  indica la reducción de la velocidad de evaporación, que puede expresarse de la siguiente forma.

$$\varepsilon = \frac{\text{Velocidad de evaporación en el tercer segmento}}{\text{Velocidad de evaporación en el segundo segmento}} \quad [14]$$

$$X < X_c \rightarrow \varepsilon < 1; \quad X > X_c \rightarrow \varepsilon = 1$$

El parámetro  $\varepsilon$  se evalúa a partir la curva experimental de secado (velocidad de secado en función de la humedad).

### ***Balance de Energía***

El balance de energía del elemento obtiene la siguiente ecuación diferencial de segundo orden que representa la variación de la temperatura de la película con respecto a su posición angular:

$$\frac{kLd}{R_2} \frac{dT^2}{d\theta^2} + k_d R_1 L \frac{T_B - T}{dd} - h R_2 L (T - T_{air}) - \frac{M}{1000} K_G * R_2 * L * \varepsilon (P^{sat} - P_w) C_{pw} T = 2\pi V_r \rho C_p d R_2 L \frac{dT}{d\theta} \quad [15]$$

De acuerdo a los autores, las ecuaciones del balance de masa y energía la densidad; espesor de la película; el calor específico; el coeficiente de transferencia de calor por convección: el coeficiente de transferencia de masa del tambor varían con la temperatura y el contenido de humedad del elemento.

Las ecuaciones de los balances se resuelven simultáneamente usando el método de Euler modificado con incrementos de un solo paso, usando las condiciones iniciales del problema, que para este caso son la temperatura, el contenido de humedad, la densidad, la viscosidad, el calor específico, la conductividad térmica de la alimentación, el espesor inicial de la película, la temperatura del medio calefactor, la conductividad térmica de la pared del tambor, y también la temperatura, densidad, viscosidad, contenido de humedad y la velocidad con la que circula el aire sobre el tambor.

#### **1.3.2.2 Ecuaciones de Diseño para Secadores de Tambor**

**Formulado por: Okos *et al.*, 1992**

Como se dijo previamente, en un secador de tambor el calor latente de condensación del vapor se transfiere hacia el producto a través de la pared del tambor. Durante el secado del producto ocurren tres períodos, que se describen a continuación:

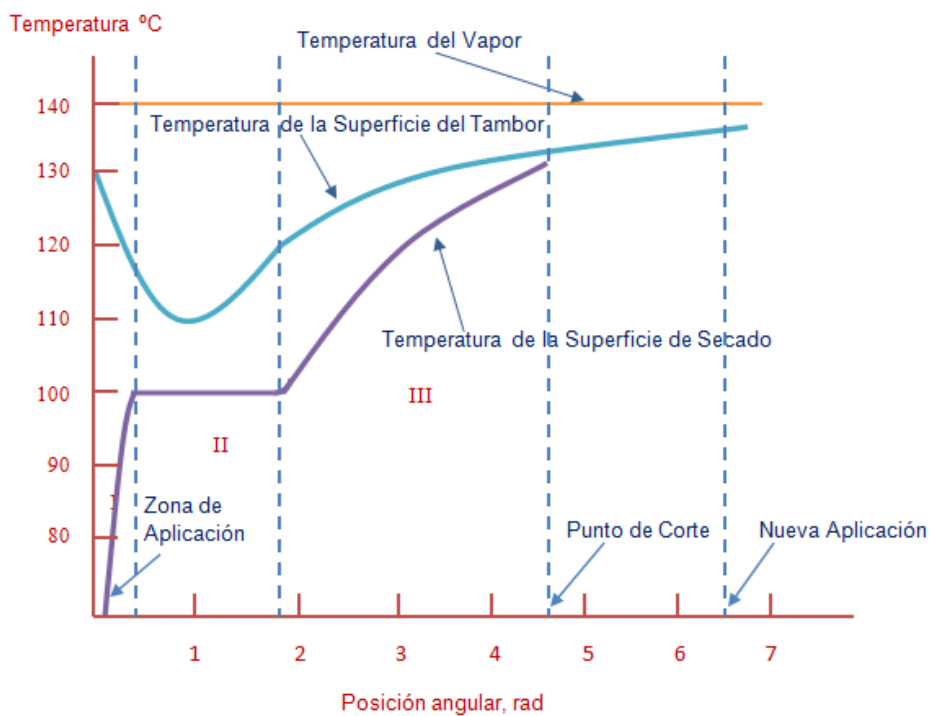
I) *Período inicial de calentamiento:* Después de que se coloca el slurry en la espacio que se forma entre los rodillos, éste forma una película delgada al pasar por el “NIP”, que es el punto donde los tambores casi se tocan entre sí como se puede ver en la figura 1.

La temperatura de la superficie del tambor decae debido a la gran remoción del calor por la ebullición del agua libre, la misma que es proporcional a la velocidad de rotación del tambor.

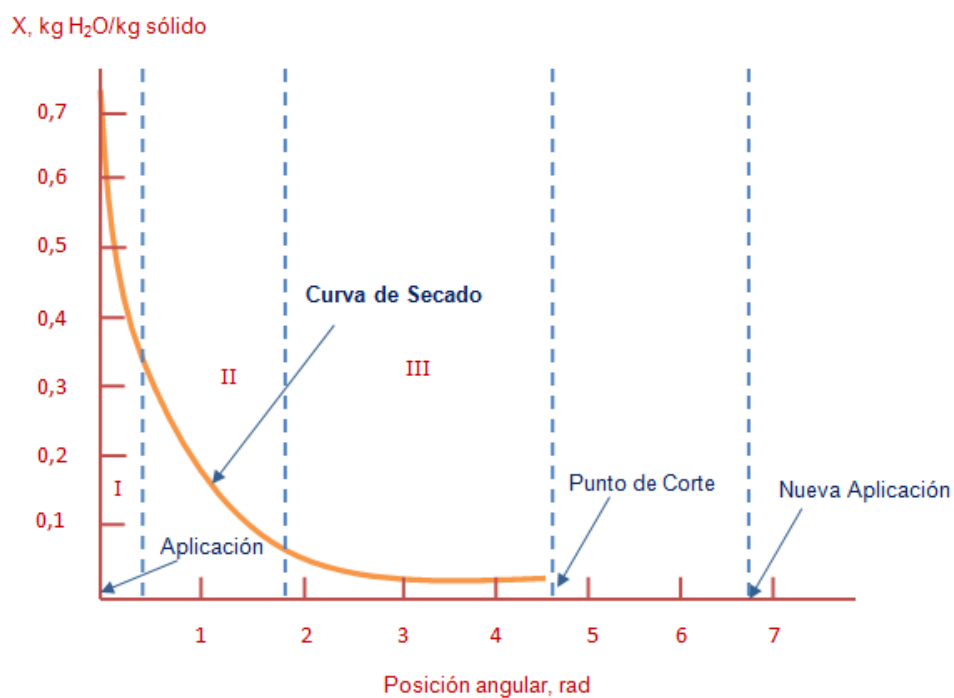
II) *Período de temperatura constante del producto:* Al alcanzar la temperatura de ebullición, se evapora una gran cantidad de agua libre y la temperatura de la película permanece constante debido a que el cambio de fase se produce a temperatura constante. En este período la temperatura de la superficie del tambor decae debido a la gran remoción de calor que se produce a consecuencia de la ebullición del agua libre, remoción que, afirma el autor, es hasta cierto punto proporcional a la velocidad de rotación del tambor, siendo menor el enfriamiento cuanto mayor sea la velocidad (Ramli, 2006).

III) *Período de incremento de la temperatura del producto:* Debido a que la mayor parte del agua libre se ha evaporado la energía que se transfiere desde el tambor excede la energía requerida para evaporar el agua en esta posición angular, lo que produce, como se puede apreciar en la figura 5, el incremento de la temperatura del tambor y por ende la temperatura de la película. Este incremento de temperatura continúa hasta que la película alcance la cuchilla, donde la película deshidratada es desprendida. Después de que la película es removida del secador, la temperatura de la superficie externa del tambor continúa incrementándose hasta que el nuevo material es aplicado.

En la figura 4 se puede observar el perfil de temperatura de un secador de tambor y en la figura 5 el perfil de humedad.



**Figura 4.** Perfil de temperatura en función de la posición angular (Ramli, 2003)



**Figura 5.** Perfil de humedad en base seca en función del ángulo recorrido (Ramli, 2003)

La velocidad de secado, durante el período de velocidad constante puede ser estimada por medio de la siguiente relación:

$$N = 4,08 \times 10^{-2} v^{0,8} \Delta P \quad [16]$$

Por otro lado, la transferencia de calor está afectada por la resistencia del condensado formado dentro de los tambores, por la resistencia de la película del material adherida al tambor y por la resistencia de la superficie externa de evaporación. Entonces la velocidad de transferencia de calor está dada por:

$$\frac{Q}{A_h t_s} = \frac{\Delta T}{\frac{1}{h_w} + \frac{1}{h_m} + \frac{1}{h_p} + \frac{1}{h + h_r + h_e}} \quad [17]$$

y,

$$N = \frac{h_e \Delta t_f}{\lambda} \quad [18]$$

Donde,

$$h_e = \frac{4,08 \times 10^{-2} v^{0,8} \Delta P \lambda}{\Delta t_f} \quad [19]$$



## **2. PARTE EXPERIMENTAL**

### **2.1 CARACTERIZACIÓN DEL BANANO Y PROCEDIMIENTO PARA LA ELABORACIÓN DE LA PASTA DE BANANO**

#### **2.1.1 CARACTERIZACIÓN DEL BANANO**

Para caracterizar el banano se determinó el color externo, el contenido de sólidos solubles y la humedad inicial del fruto.

##### **2.1.1.1 Determinación de color**

El color externo del banano se caracterizó mediante el grado de madurez, de acuerdo a la carta de color según la escala de Von Loesecke (Díaz, 1982), que se puede encontrar en el Anexo I.

##### **2.1.1.2 Determinación de sólidos solubles**

El contenido de sólidos solubles de la pasta de los bananos, que se expresa en grados Brix, se determinó, con una precisión de  $\pm 0,5$  °Brix, utilizando un refractómetro marca BELLINGHAM & STANLEY.

##### **2.1.1.3 Determinación de la humedad inicial**

La humedad inicial se determinó deshidratando un peso aproximado de 4 gramos de pasta húmeda de banano a 100 °C por 24 horas en una estufa THELCO, modelo 28, hasta sequedad total.

Los pesos netos se determinaron sustrayendo el peso bruto de la muestra (peso de muestra más el peso del crisol), del peso del crisol, habiéndose utilizado, para esto, una balanza OHAUS, modelo SC2020, con una precisión  $\pm 0,01$  g.

Las humedades iniciales, expresadas en kg de agua/kg de sólido seco, se obtuvieron, en todos los casos, dividiendo la diferencia entre el peso húmedo y el peso seco para el peso seco. Un ejemplo de cálculo se presenta en el numeral 1.1 del Anexo II.

## **2.1.2 PROCEDIMIENTO PARA LA ELABORACIÓN DE LA PASTA DE BANANO**

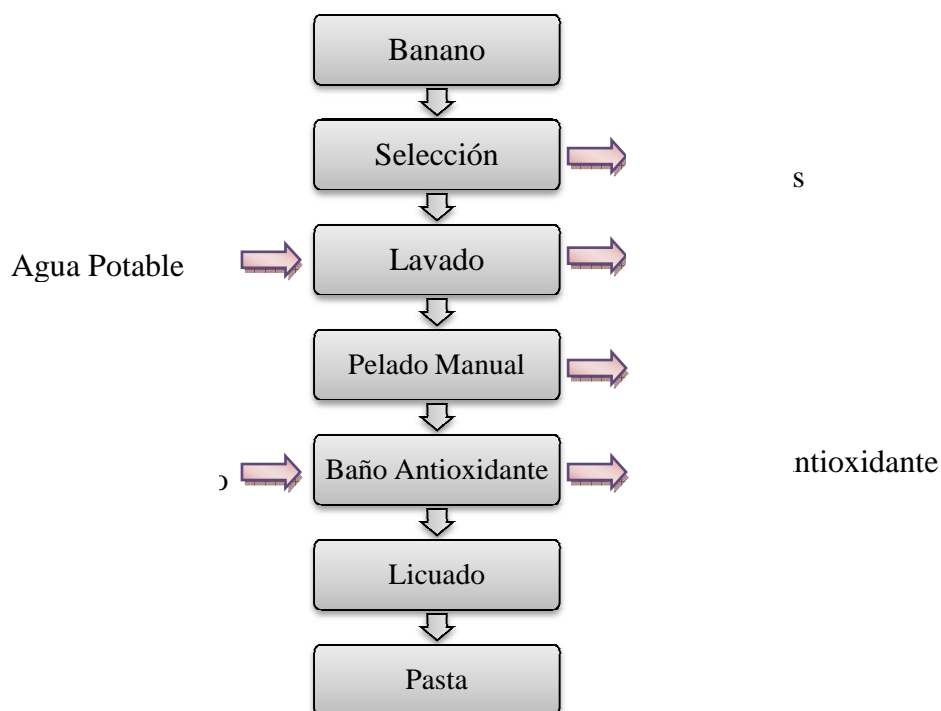
En la figura 6 se puede observar el procedimiento utilizado para obtener la pasta, en todos los experimentos, en forma de un diagrama de bloques, los que se explican a continuación:

### **2.1.2.1 Selección**

Los bananos se seleccionaron de manera que su grado de madurez se encuentre entre 4 y 5 en la escala de Von Loesecke.

### **2.1.2.2 Lavado, pelado y tratamiento antioxidante**

Los bananos se lavaron a mano hasta remover las impurezas adheridas a las cáscaras, utilizando agua potable. Después del lavado, los bananos se pelaron manualmente, e inmediatamente se sumergieron en una solución antioxidante de ácido ascórbico al 0,5 % por 3 minutos.



**Figura 6.** Esquema de la elaboración de la pasta

### 2.1.2.3 Licuado

Después del baño antioxidante los frutos se procesaron en un molino coloidal marca FRYMA, modelo MZ-80/R, con un paso de 0,20 mm de apertura entre el estator fijo y el rotor giratorio, que se calibró por medio de una galga. El estator y el rotor se pueden observar en la figura 7.



**Figura 7.** Rotor y estator cónicos, con ranuras en la periferia

## **2.2 DESHIDRATACIÓN DE LA PASTA DE BANANO**

### **2.2.1 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO**

La deshidratación de la pasta de banano se realizó en un secador atmosférico de doble tambor GF Double Drum Dryer, Model 215 fabricado por Mathis Machine Corporation, que se puede observar en la figura 9.

Cada uno de los dos tambores del secador fue fabricado en acero inoxidable 316. Cada tambor tiene 12,7 cm de diámetro y 23,5 cm de longitud, está dotado de cuchillas ubicadas a 208° del punto de aplicación de la pasta húmeda que sirven para desprender el producto deshidratado, y se calienta por medio de vapor saturado que proviene de un calderín eléctrico.

### **2.2.2 FUNCIONAMIENTO DEL SECADOR**

La pasta del material que se desea deshidratar se vierte en el espacio que se forma entre los tambores hasta una altura de alimentación especificada, que debe ser siempre la misma, que se puede observar referencialmente en la figura 9.

Los tambores giran en dirección al espacio de alimentación, y –como se ha dicho– el espaciamiento entre ellos determina el espesor de la película que se forma sobre su superficie.

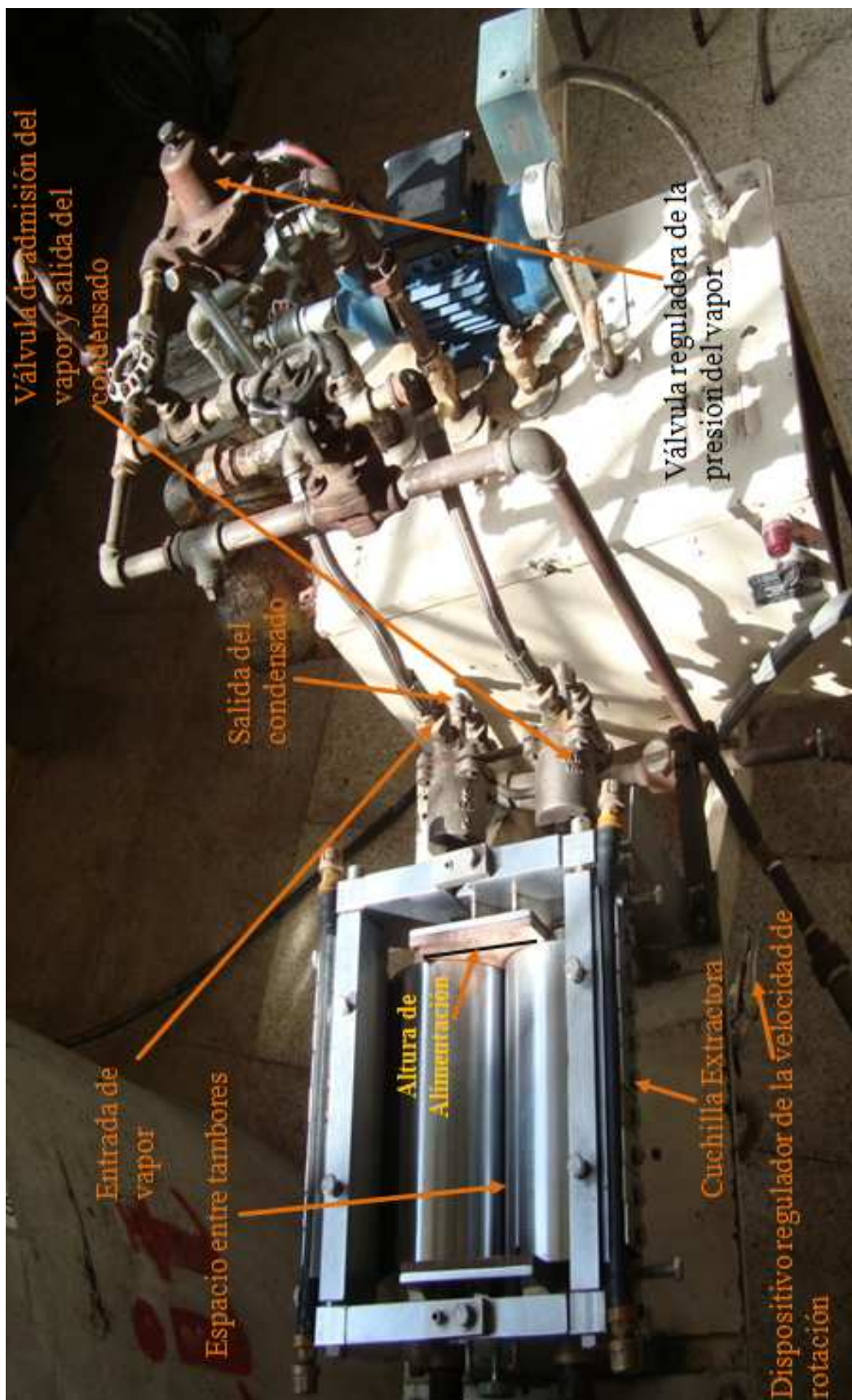


Figura 8. Foto que ilustra las partes del secador que se manejan en el proceso de secado

### **2.2.3 DISEÑO EXPERIMENTAL**

Se estudió la influencia de la presión del vapor saturado, la separación entre los tambores y su velocidad de rotación sobre la humedad final, el flujo másico y la velocidad de evaporación del agua.

#### **2.2.3.1 Presión del vapor**

El valor de la presión del vapor de calentamiento se fijó mediante la válvula reguladora de presión, que se puede observar en la Figura 9.

Las presiones de vapor utilizadas fueron: 20; 30; 40; 50 y 60 psig, medidas con una precisión  $\pm 0,5$  psig (1,36; 2,04; 2,72; 3,40 y 4,08 atm con una precisión  $\pm 0,03$  atm respectivamente), manteniendo la separación entre los tambores en 0,20 mm; y su velocidad de rotación en 6 rpm  $\pm 0,5$  rpm.

#### **2.2.3.2 Separación entre los tambores**

Para establecer la separación entre los tambores, se empleó un calibrador de láminas TRUPER. Para calibrar la separación se encajó la lámina seleccionada entre los tambores, y se manipuló el mecanismo de ajuste hasta que ésta pasaba ajustadamente entre ellos.

Los experimentos se realizaron a 0,20; 0,30; 0,40; 0,50 y 0,60 mm de separación, a 6 rpm  $\pm 0,5$  rpm de velocidad, y a 60 psig  $\pm 0,5$  psig (4,08 atm  $\pm 0,03$  atm).

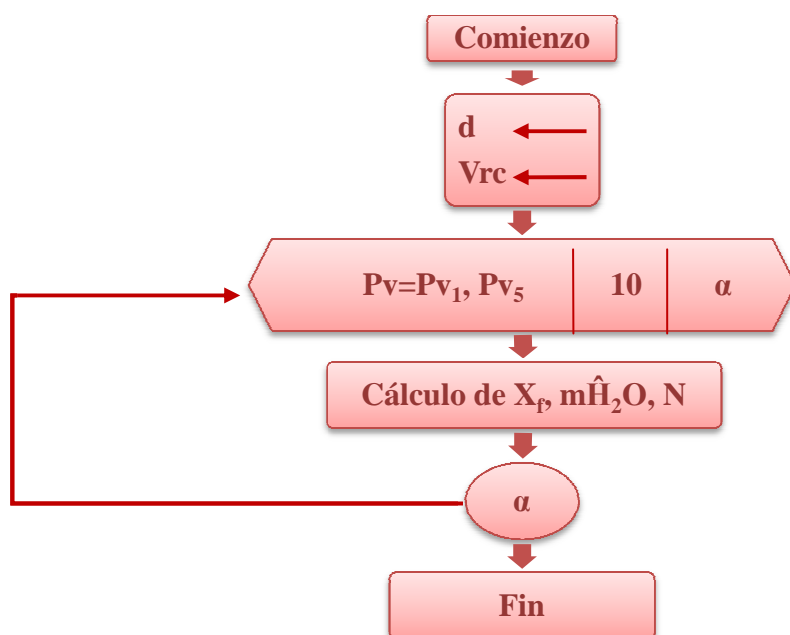
#### **2.2.3.3 Velocidad de rotación**

Los experimentos se realizaron a 5; 6 y 7 rpm con una precisión  $\pm 0,5$  rpm; con una separación entre tambores de 0,20 mm, y con vapor saturado de 60 psig  $\pm 0,5$  psig (4,08 atm  $\pm 0,03$  atm).

### 2.2.3.4 Pruebas Experimentales

El diseño experimental consideró, en cada caso, al menos 3 niveles de variación, y dos repeticiones para cada variación. Para cada repetición se determinó, como se reporta en el siguiente capítulo, la humedad final de las películas deshidratadas, el flujo másico del agua evaporada y la velocidad de evaporación del agua.

Para cada experimento se cambió el valor de una de las variables, y se mantuvo fijos los otros dos. Para esto se trabajó primero con la presión del vapor, luego con la separación entre los tambores, y finalmente con la velocidad de rotación. Este procedimiento se muestra en la figura 9 en forma de diagrama de flujo ANSI.



**Figura 9.** Diagrama de flujo ANSI del esquema experimental para la determinación de  $X$ ,  $mH_2O$  y  $N$

La deshidratación se realizó en modalidad semi-batch, debido que, por disponerse de cantidades limitadas de banano, no fue posible trabajar en forma continua, como se habría deseado. Para la alimentación de la pasta al secador se utilizó una probeta graduada de 1 litro con una precisión de  $\pm 0,005$  l, y se mantuvo una altura de alimentación de  $4,22 \pm 0,025$  cm, cuyo valor se determinó con un

calibrador ORION. El peso de la probeta vacía y el peso de la probeta conteniendo la pasta de banano se registraron en una balanza OHAUS, modelo TRSTR, de precisión  $\pm 0,001$  kg.

Durante las pruebas de deshidratación se registraron, para cada variable, los pesos de las películas deshidratadas, los tiempos de secado, y los pesos del vapor condensado.

Las películas deshidratadas (producto seco) se pesaron, en una balanza OHAUS, modelo SC2020, con una precisión  $\pm 0,01$  g.

La humedad final de cada una de las pruebas se determinó al secar a  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  una muestra de las películas deshidratadas, de 4 gramos de peso aproximado, por 24 horas en una estufa THELCO, Modelo 28. La humedad final se expresó en kg de agua/kg de sólido seco, al igual que la humedad inicial. Para estas determinaciones se utilizó una balanza OHAUS, modelo SC2020, con una precisión  $\pm 0,01$  g, presentándose un ejemplo de cálculo en el Anexo II, numeral 1.2.

El condensado fue colectado en un recipiente con agua para evitar expansiones súbitas que hicieran que se pierda condensado en forma de vapor. Para determinar su peso se utilizó una balanza OHAUS, modelo TRSTR, de precisión  $\pm 0,001$  kg. El flujo másico del vapor se obtuvo al dividir el peso del condensado para el tiempo de secado.

Se realizó el balance de masa para determinar el flujo másico del agua evaporada. Un ejemplo de cálculo se presenta en el numeral 2 del Anexo II.

Simultáneamente se llevó a cabo un balance de energía, con el que también se determinó el flujo másico del agua evaporada. El balance consideró que el calor latente a la presión del vapor multiplicado por el flujo másico del vapor es igual al flujo másico del agua evaporada por su calor latente a la temperatura de ebullición más las pérdidas de calor por convección desde la película de sustancia seca, y



desde la superficie no utilizada del tambor. El flujo másico del vapor se obtuvo al dividir el peso del condensado para el tiempo de secado.

Un ejemplo de cálculo del balance de masa y energía se presenta en el numeral 2 del Anexo II.

Se compararon los resultados determinados con el balance de masa y el balance de energía mediante la variación porcentual relativa. En el numeral 8.1 del Anexo II se encuentra un ejemplo de cálculo.

Por ser un proceso semi-batch, el área de secado se obtuvo multiplicando la velocidad de rotación de los tambores por el tiempo de secado y por el área efectiva de los tambores. La velocidad de evaporación del agua en kg de agua/h  $m^2$  se obtuvo al dividir el flujo másico del agua evaporada para el área de la película deshidratada. En el numeral 3 del Anexo II se presentan los ejemplos de estos cálculos.

Los resultados obtenidos en el presente Proyecto de Titulación tienen un intervalo de confianza del 99%, que se determinó utilizando el estadístico  $t_c$  de Student. Un ejemplo de la estimación del intervalo se puede encontrar en el Anexo II, numeral 9.

## **2.3 DESARROLLO DE LOS ALGORITMOS DE CÁLCULO**

Previo al desarrollo del algoritmo se analizaron los modelos citados en la revisión bibliográfica: Mathematical Modeling and Computer Simulation of a Drum Dryer (Kasiri et al., 2004); Modelling of Drum Drying (Vasseur et al., 1991) y Las Ecuaciones de Diseño para Secadores de Tambor (Okos et al., 1992).

## **ECUACIONES DE DISEÑO PARA SECADORES DE TAMBOR**

Después de analizar los modelos citados, se seleccionó el modelo de Las Ecuaciones de Diseño para Secadores de Tambor, orientadas a la evaporación del agua libre, formuladas por Okos *et al.*, 1992, que se detallaron en el numeral 1.3.2.2.

De acuerdo a Moore, 1995; la velocidad de secado no está controlada por la difusión de la humedad a través de la película del material depositada sobre la superficie del tambor, por ser ésta relativamente delgada.

Además, y de acuerdo a Ramli y Daud, 2006; la repentina exposición a la alta temperatura de la pared del secador y al intenso flujo de calor sobre la superficie del tambor en la zona de aplicación de la pasta alimentada causa un incremento de temperatura y la ebullición del agua contenida en el sólido. Por esto, afirman estos autores, la humedad libre se pierde en un período inicial de calentamiento, y el resto del agua se pierde en el período de velocidad constante, mientras que la humedad ligada se pierde en el período de velocidad decreciente.

Por lo expuesto anteriormente en este Proyecto de Titulación se consideró que las ecuaciones de Okos son válidas para todo el ciclo de secado.

Sobre esta base se desarrollaron dos algoritmos para el diseño de los programas que permiten el dimensionamiento de secadores de doble tambor.

El primero, fue propuesto por Guerra, 2008, sobre la base de las ecuaciones de diseño formuladas por Okos *et al.*, 1992, y engloba la iteración de la temperatura de la superficie se secado y la determinación de la velocidad de evaporación del agua, como se representa en el diagrama de flujo ANSI de la figura 10.

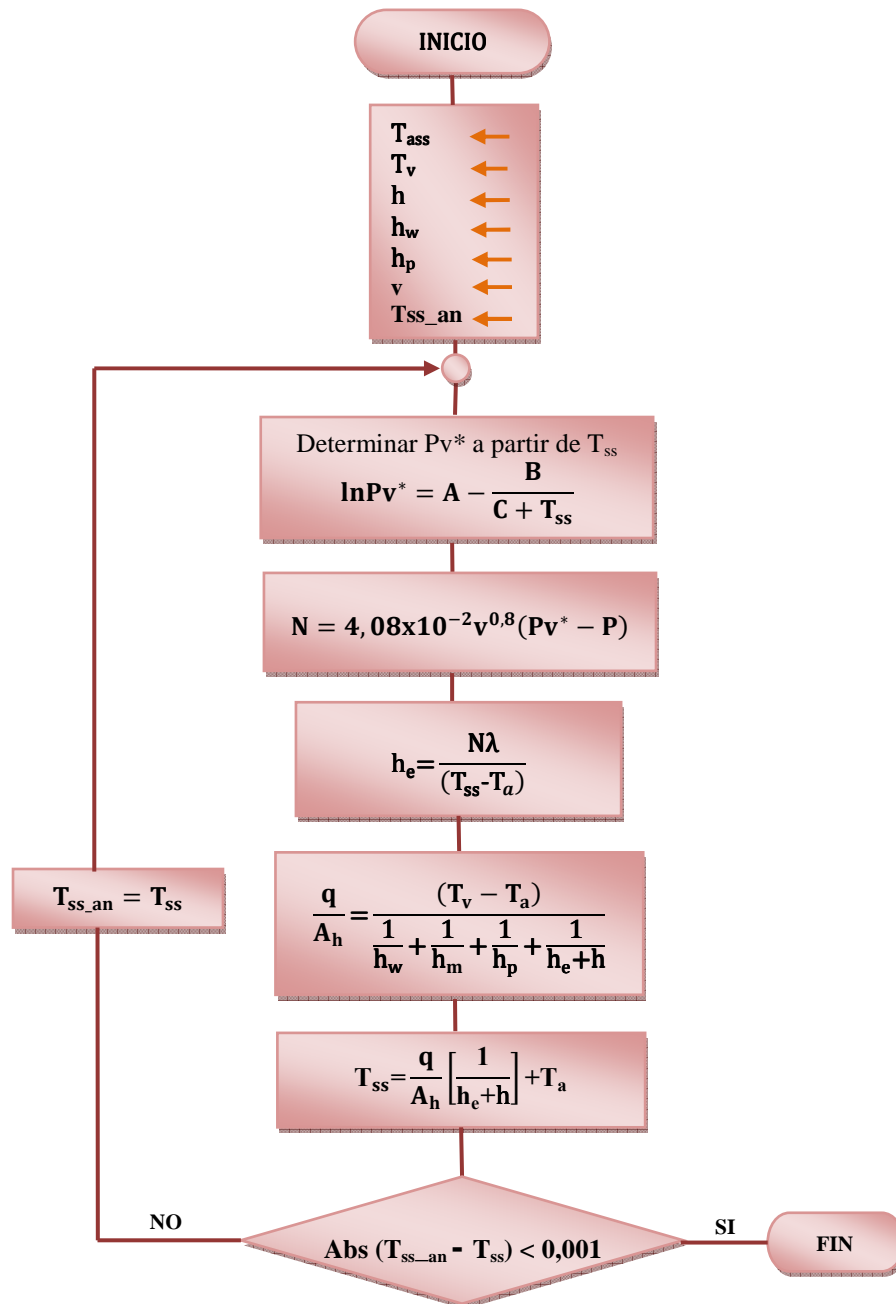
El modelo considera que la transferencia de calor ocurre a estado estacionario, permitió, mediante iteración, obtener un valor único de la temperatura de la superficie de secado (película deshidratada).

Este algoritmo se utiliza para estimar la temperatura de la superficie del secado, que se denota como  $T_{ss}$ . Esta temperatura sirve –a su vez– para estimar la presión de vapor del agua sobre esa superficie, presión con la que se estima la velocidad de evaporación del agua  $N$ , expresada en  $\text{kg H}_2\text{O/h m}^2$ .

Para estimar el valor de la temperatura de la superficie de secado se parte de un valor asumido que se denomina  $T_{ass}$  con el que se calcula la presión del vapor de agua sobre esta superficie, que permite el cálculo de la velocidad de secado; y con este valor se calcula un coeficiente de evaporación  $h_e$ , con el que se calcula un valor de la tasa de calor  $q/A_h$  transferida. Con el calor  $q/A_h$  se calcula, de forma independiente, un “valor calculado” de  $T_{ss}$ , que se compara con el valor anterior de temperatura.

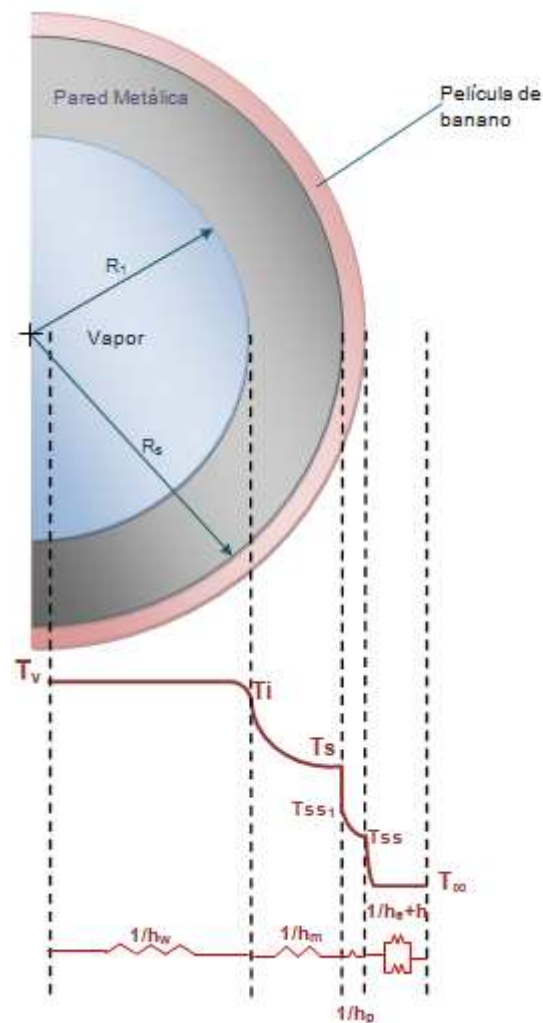
Para satisfacer el criterio de convergencia, se establece que el valor absoluto de la diferencia entre el valor  $T_{ss\_an} - T_{ss}$  debe ser menor que un valor pequeño  $\xi$  preestablecido como se puede ver en el diagrama de flujo de la figura 10,  $\xi=0,001$ , por ejemplo.

Si el valor calculado no cumple este criterio se repite el cálculo usando el valor calculado  $T_{ss}$  como valor anterior  $T_{ss\_an}$ , hasta que el criterio se cumpla y se obtenga un valor constante de temperatura de la superficie de secado, que permita establecer el valor de la velocidad de secado.



**Figura 10.** Diagrama de Flujo ANSI del algoritmo de cálculo de la temperatura de la superficie de secado (Guerra, 2008)

Las resistencias de la transferencia de calor se esquematizan en la siguiente figura:



**Figura 11.** Resistencias que afectan la transferencia de calor en el proceso de secado

En la implementación del algoritmo no se consideró la radiación porque a los valores de temperatura considerados este mecanismo no es importante.

Los valores de utilizados de los coeficientes de transferencia de calor se muestran en el Anexo II, numeral 4.

Como el proceso de secado se realizó en condiciones de convección natural a pesar que las ecuaciones de diseño fueron desarrolladas para convección forzada, fue necesario estimar una velocidad referencial del aire para poder utilizar la ecuación de velocidad de secado utilizada en el algoritmo de la figura 10. Esto se hizo a partir de los valores experimentales de la velocidad de secado,

determinados en este Proyecto de Titulación, como se muestra en el numeral 5 del Anexo II.

La presión de saturación a la temperatura de la superficie de secado se estimó utilizando la ecuación de Antoine, como se puede observar en la figura 10. La presión parcial del vapor se estimó, por otro lado, a la temperatura del aire circundante, lo que se muestra en el numeral 5 del Anexo II, en forma de un ejemplo de cálculo.

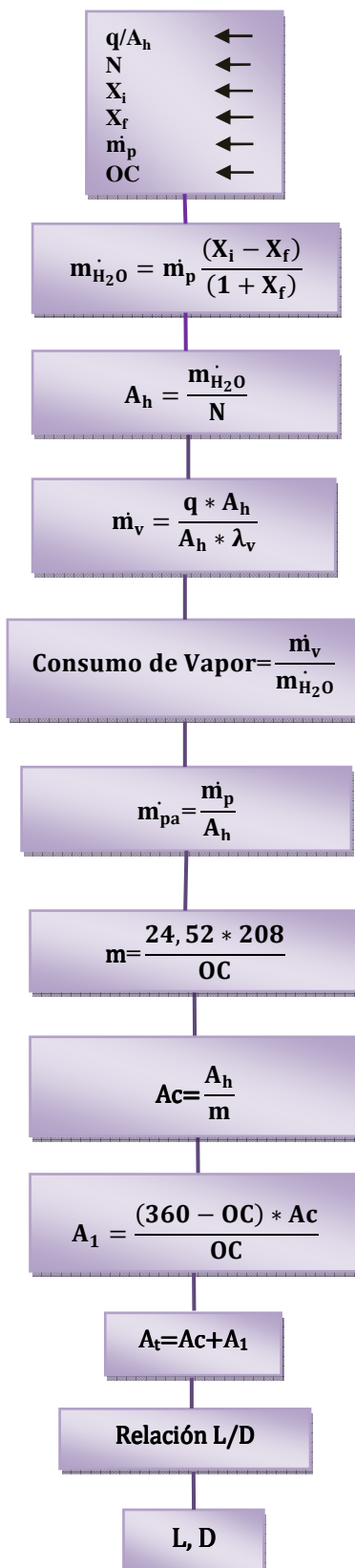
El segundo algoritmo permitió hallar el área de la película deshidratada sobre la base del flujo másico y la velocidad de evaporación del agua.

Debido a que las pruebas de deshidratación se realizaron en modalidad semibatch; se determinó un factor de área igual a la relación entre el número de revoluciones totales y el ángulo de contacto (ángulo del arco del secador que se encuentra en contacto con la superficie de la película deshidratada). El factor de área se explica detalladamente en el ejemplo de cálculo del numeral 6 del Anexo II.

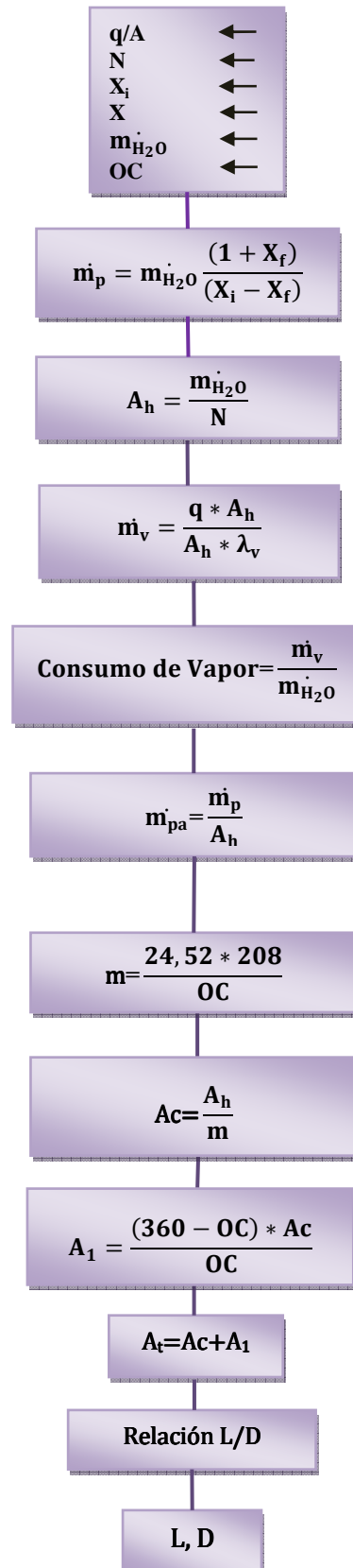
El área efectiva de los tambores (área en contacto con la película deshidratada) se obtuvo de la relación entre el área de la película deshidratada y el factor de área; mientras que, el área libre (área en contacto con el aire) se determinó a partir del área efectiva de los tambores y el ángulo de contacto. Finalmente el área total del secador es la sumatoria del área efectiva y el área libre.

La longitud y el diámetro del secador se obtuvieron a partir del área total, y de la relación L/D del secador con que se trabajó en los experimentos. El respectivo ejemplo de cálculo se puede encontrar en el Anexo II, numeral 7.

Como resultados adicionales se determinaron el consumo de vapor específico y la velocidad de producción. En las figuras 12 y 13 se pueden apreciar los diagramas de flujo ANSI del segundo algoritmo en dos formas, de acuerdo al parámetro de entrada, que pueden ser, o el flujo másico de producción, o el flujo másico del agua evaporada.



**Figura 12.** Diagrama de Cálculo del dimensionamiento del secador de doble tambor  
Parámetro de entrada: Flujo másico de producción



**Figura 13.** Diagrama de Cálculo del dimensionamiento del secador de doble tambor  
 Parámetro de entrada: Flujo másico del agua evaporada



## **2.4 DISEÑO DEL SOFTWARE PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE UN SECADOR DE DOBLE TAMBOR**

Se desarrolló dos programas en Visual Basic™ 6.0 sobre la base de los algoritmos establecidos, SETA I Y SETA II; cada uno con 9 subrutinas, que se enlazan de acuerdo a los diagramas de flujo que se encuentran en el Anexo IV.

La pantalla de introducción de datos de los programas consideran como parámetros de entrada a: (1) Presión del vapor; (2) Presión atmosférica; (3) Coeficiente de transferencia de calor por convección; (4) Coeficiente de transferencia de calor por condensación; (5) Coeficiente de transferencia de calor de la película; (6) Coeficiente de transferencia de calor de la pared del secador; (7) Temperatura del aire circundante; (8) Velocidad del aire; (9) Humedad inicial; (10) Humedad final; y (11) El flujo másico de producción, en el caso del primer programa o el flujo másico del agua evaporada, en el caso del segundo.

Con los parámetros anteriores, los programas obtienen la longitud y el diámetro del secador deseado.

Para comprobar el funcionamiento de los programas SETA I y SETA II, estos se ejecutaron con los resultados experimentales (los que se utilizan como parámetros de entrada).

Se comparó los resultados experimentales con los resultados obtenidos de los programas, mediante el cálculo de la variación porcentual relativa. En este caso la variación porcentual relativa se calcula como se presenta en el numeral 8.2 del Anexo II.

Además, se utilizó un contraste de hipótesis para pequeñas muestras, utilizando el estadígrafo t de Student por medio de la diferencia entre las medias aritméticas de las áreas nominales calculadas por los programas y el área nominal real.

También se ejecutó el programa utilizando como parámetro de entrada el flujo másico del agua evaporada de los catálogos de empresas norteamericanas especializadas en la fabricación comercial de secadores de doble tambor; y se comparó las dimensiones obtenidas por el programa con las dimensiones de los secadores industriales mediante la variación porcentual relativa.

Los programas permitieron encontrar adicionalmente: (1) El valor medio de la temperatura de la superficie del producto; y (2) El flujo másico de producción cuando se ingresó como dato el flujo másico del agua evaporada; o el flujo másico de agua evaporada cuando se ingresó el flujo másico de producción como dato; (3) El consumo de vapor; (4) La productividad por metro cuadrado.

Finalmente se procedió a preparar un Manual de Usuario para la utilización de los programas, que se puede encontrar en el Anexo V.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 CARACTERIZACIÓN DEL BANANO Y PROCEDIMIENTO PARA LA ELABORACIÓN DE LA PASTA DE BANANO

El contenido de sólidos solubles y la humedad inicial del banano representan un índice o estado de madurez útil de este fruto climatérico, cuya cantidad de sólidos solubles o azúcares, y humedad, aumentan a medida que progresa la maduración.

En la tabla 5 se muestran los resultados de la determinación del contenido de sólidos solubles, color y humedad inicial.

**Tabla 5.** Caracterización del banano

Parámetro	Valor	z
Sólidos solubles, °Brix	19,33 ± 0,60	6
Xi, kg H <sub>2</sub> O/kg Sólido Seco	2,96 ± 0,16	6
Color (escala de color)	4,60 ± 1,05	6

La coloración de la cáscara permite diferenciar visualmente la madurez del banano. Según la escala de Von Loesecke que se muestra en el Anexo I, existen ocho grados de madurez; correspondiendo el grado 1 al banano completamente verde, y el 8 al banano totalmente maduro.

El grado de madurez tiene gran importancia en el secado. Esto se puede apreciar considerando que al realizar las pruebas iniciales de deshidratación en el secador de doble tambor, se pudo observar que las cuchillas no desprendían adecuadamente la película de banano deshidratada de la superficie de los tambores, debido a que se utilizaron bananos de grado entre 7 y 8, cuya concentración de azúcares, por ser alta, producía una caramelización que impedía la adecuada formación de la película de banano.

Por este motivo en los ensayos subsiguientes se decidió utilizar bananos de grado de madurez entre 4 y 5, con lo que se obtuvo un desprendimiento adecuado de las películas, que tuvieron, además, buenas características.

Por estas razones para realizar los experimentos se adquirieron cabezas de banano de grado de madurez 3, que se maduraron a temperatura ambiente hasta un grado de entre 4 y 5.

## **3.2 DISEÑO EXPERIMENTAL**

Los experimentos se realizaron para determinar la influencia de las siguientes variables del proceso: (1) La presión del vapor; (2) La separación entre tambores; y (3) La velocidad de rotación de los tambores sobre (1) La humedad final; (2) El flujo másico del agua evaporada; y (3) La velocidad de secado.

### **3.2.1 PRUEBAS EXPERIMENTALES**

#### **3.2.1.1 Humedad final**

Antes de obtener resultados definitivos, se realizaron varias pruebas preliminares de deshidratación con aproximadamente 0,8 kg de pasta para cada condición de operación. Las pruebas experimentales permitieron registrar los tiempos de secado y establecer la humedad final de las películas deshidratadas.

En el numeral 1.1 del Anexo III se puede encontrar los tiempos de secado y los resultados preliminares de humedad final, con sus respectivos intervalos de confianza para las diferentes condiciones de operación del secador. Las pruebas preliminares, contribuyeron a que las pruebas definitivas se realicen en rangos de operación factibles, cuyos resultados finales promedio se utilizaron en los programas para el dimensionamiento del secador.

Las cantidades de pasta empleadas en las pruebas definitivas; así como también los pesos de las películas deshidratadas y del condensado recogido se encuentran en los numerales 2.1, 2.2 y 2.3 respectivamente del Anexo III.

De las pruebas definitivas se estableció que los tiempos de secado registrados se encontraban dentro del intervalo de confianza estimado, como se muestra en el numeral 2.4 del Anexo III.

Se encontró que la mayoría de los valores experimentales de humedad final se hallaban dentro del intervalo de confianza estimado. La minoría de valores no cumplieron esta condición no se descartaron, y pueden encontrarse el numeral 2.5 del Anexo III para referencia.

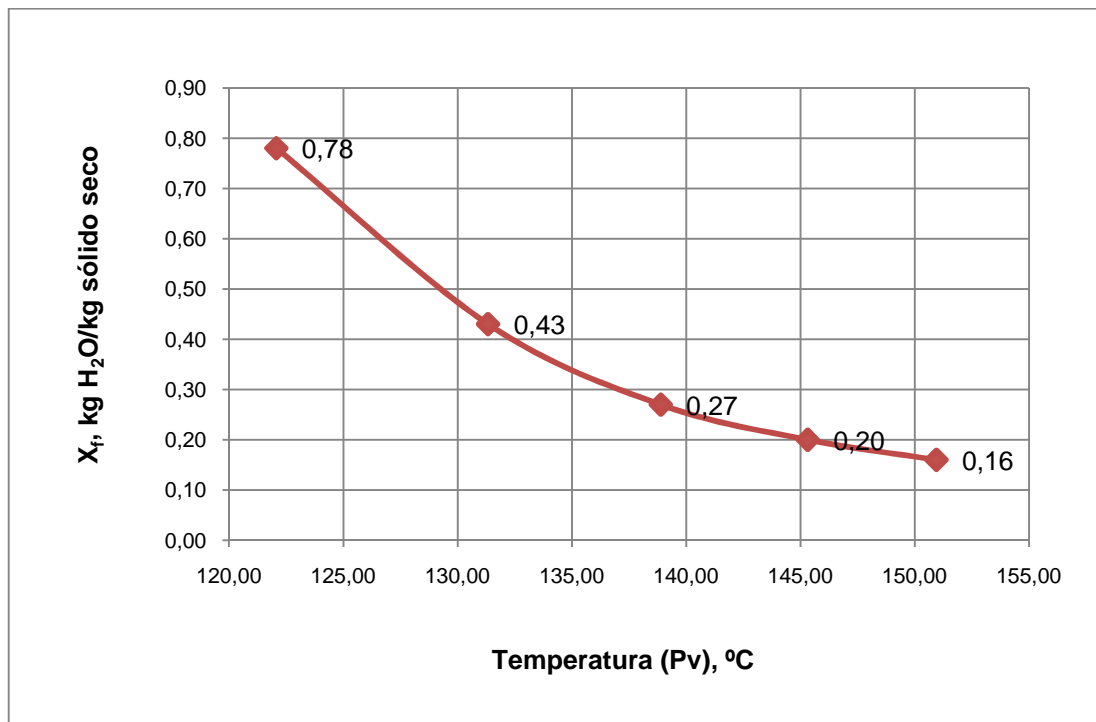
En este sentido la humedad final se determinó, tomando diferentes trozos de película correspondientes a distintas zonas del secador, al azar, para asegurar que la humedad final determinada represente la de toda la película.

Sin embargo, el que la deshidratación se haya realizado en modalidad semi-batch, y que la alimentación y el retiro de la hoja se haya ejecutado manualmente determinaron casos en los que no se pudo conseguir la formación adecuada de una sola película deshidratada, sino porciones separadas que debieron usarse en la determinación de la humedad final; lo que en cierta manera justifica que algunos valores de humedad final se encontrasen fuera del intervalo de confianza establecido.

### **Disminución de la humedad final con el incremento de la temperatura del vapor de calentamiento**

En la figura 14 se puede apreciar la disminución de la humedad final con el incremento la temperatura del vapor saturado que se usó como medio de calentamiento.

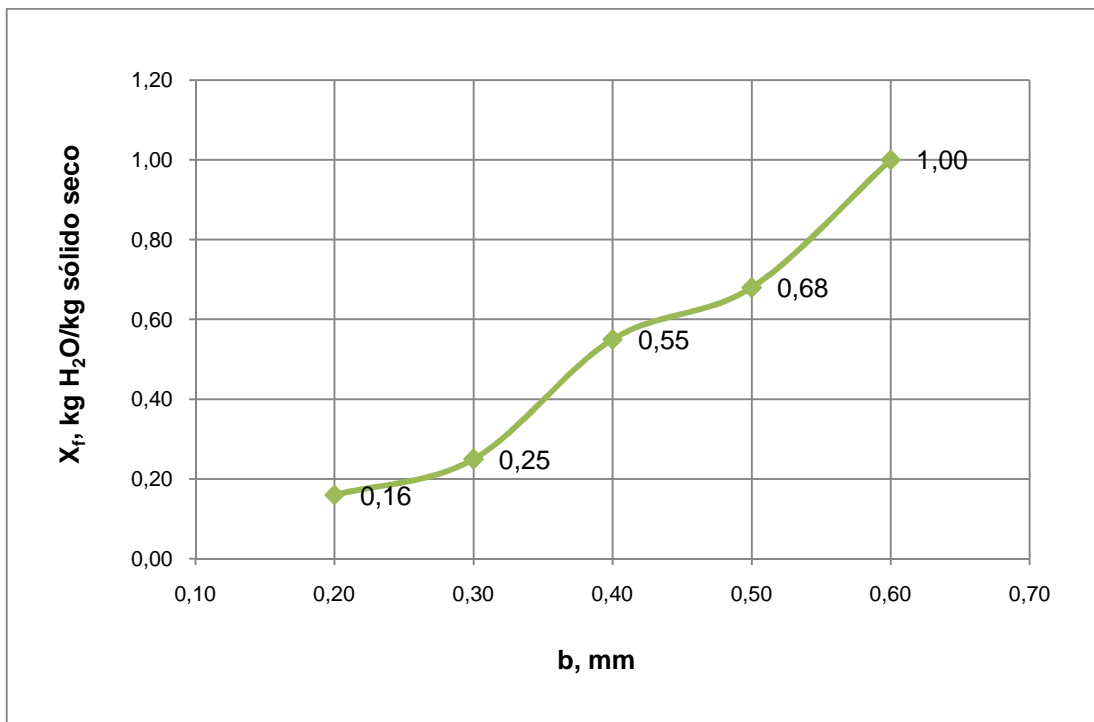
La tendencia que se muestra en el gráfico es correcta debido a que al incrementarse la temperatura del medio de calentamiento se incrementa el gradiente de temperatura que produce la transferencia de calor, lo que a su vez incrementa la velocidad de evaporación del agua, y produce un material con menor contenido de humedad final para las condiciones constantes señaladas en la figura, para pastas de  $X_i=2,96$  kg H<sub>2</sub>O/kg sólido seco



**Figura 14.** Variación de la humedad final en función de la temperatura del vapor  
V<sub>rc</sub>=6 rpm; b=0,20 mm para pastas de  $X_i=2,96$  kg H<sub>2</sub>O/kg sólido seco

### **Aumento de la humedad final con el incremento de la separación entre tambores**

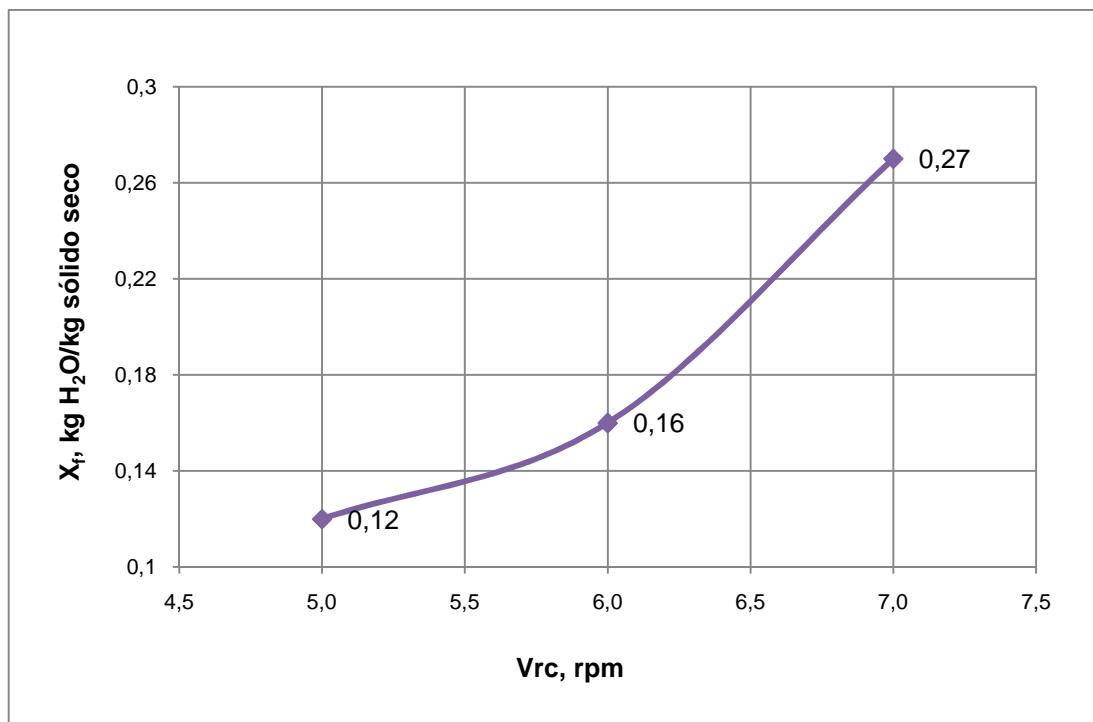
Al aumentarse la separación entre los tambores del secador aumentó el espesor de la película, que implicó la disminución del tiempo de residencia de la película en el secador, obteniéndose un producto con mayor contenido de humedad final que otro obtenido con una menor separación entre cilindros, que es lo que se puede observar en la figura 15 a continuación.



**Figura 15.** Variación de la humedad final en función de la separación entre tambores  
 $V_{rc}=6$  rpm;  $P_v=60$  psig para pastas de  $X_i=2,96$  kg H<sub>2</sub>O/kg sólido seco

### **Aumento de la humedad final con el incremento de la velocidad de rotación**

Cuando se aumenta la velocidad de rotación de los tambores del secador se obtiene un producto con mayor humedad final media, como se puede observar en la figura 16, que se debe a que el tiempo de residencia del material disminuye, y la energía transferida por unidad de masa también.



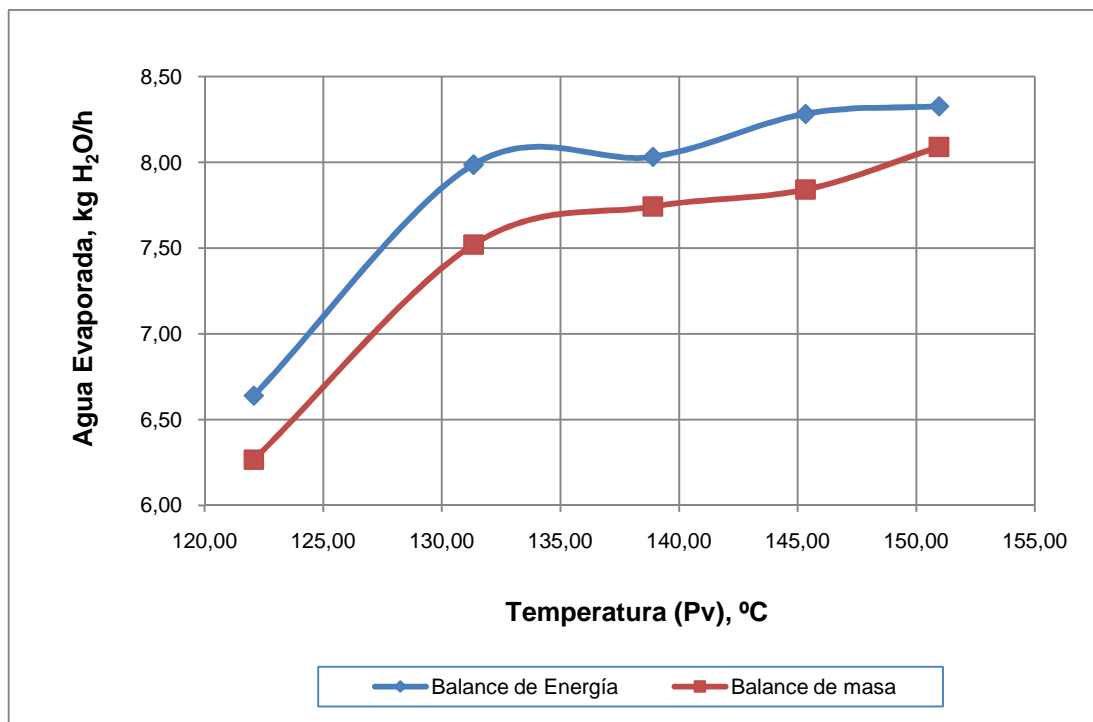
**Figura 16.** Variación de la humedad final media en función de la velocidad de rotación de los tambores:  $P_v = 60$  psig;  $b=0,20$  mm para pastas de  $X_i=2,96$  kg H<sub>2</sub>O/kg sólido seco

### 3.2.1.2 Flujo másico del agua evaporada

#### **Aumento del flujo másico de agua evaporada con el incremento de la temperatura del vapor**

En la figura 17 se puede apreciar que a medida que aumenta la temperatura del vapor, aumenta el flujo másico de evaporación del agua; pues, aunque el tiempo de residencia es aproximadamente constante, también se puede notar un incremento en el flujo másico del vapor, cuyos valores se encuentran tabulados en el numeral 3.1.7 del Anexo III, estos factores promovieron el incremento del flujo de evaporación.





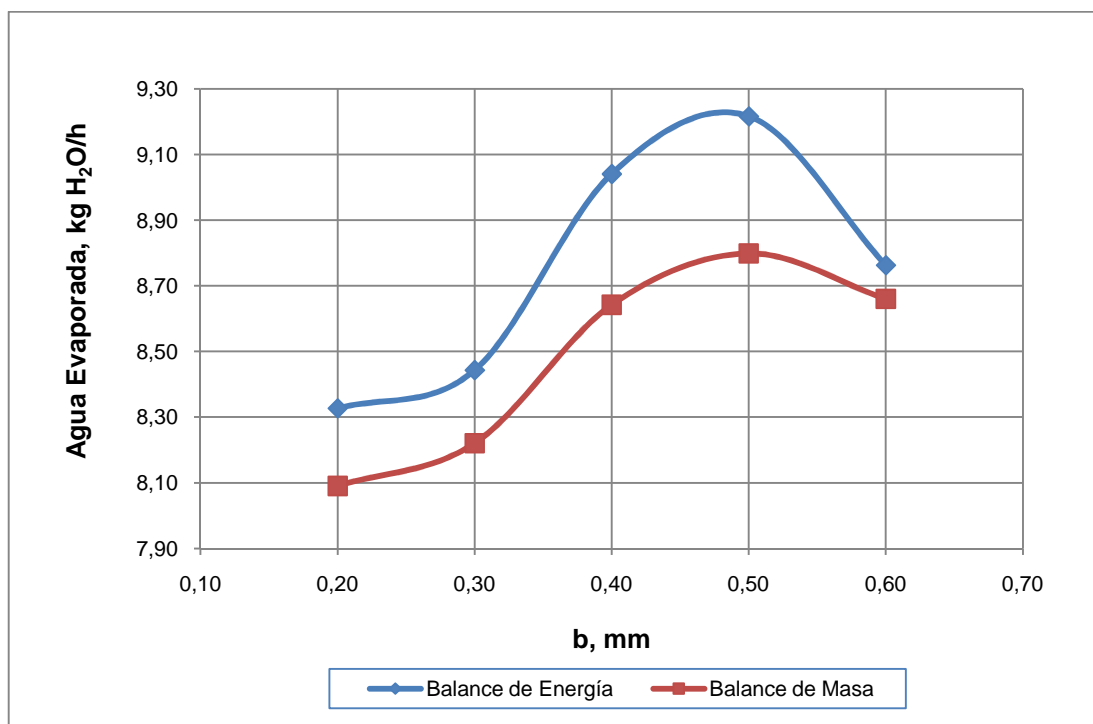
**Figura 17.** Flujo másico del agua evaporada en función de la temperatura del vapor  
 $V_{rc}=6$  rpm;  $b=0,20$  mm

### **Aumento del flujo másico de agua evaporada con el incremento de la separación entre tambores**

En la figura 18 se puede ver que los valores de los flujos másicos de agua en kg/h crecen con la separación, debido al aumento del consumo de vapor; pues a medida que se incrementó la separación entre los tambores, el espesor de la película deshidratada fue mayor, ocasionando la disminución del tiempo de secado (semi-batch); cabe recordar, que el flujo de vapor se determinó al dividir el peso del condensado recolectado para el tiempo de secado. Los flujos másicos del vapor se pueden observar en el numeral 3.1.7 del Anexo III.

Sin embargo de esto a una distancia de separación de 0,60 mm entre los tambores esta tendencia se interrumpe, y se invierte. Se consideró que estos puntos dispersos, se pudieron haber originado porque la película que se formó fue demasiado gruesa y frágil, y por ende difícil de remover; y que por esto se produjo

una acumulación de pasta de banano que actuó como un sumidero de calor, lo que produjo un descenso de temperatura y un aumento de la humedad final.



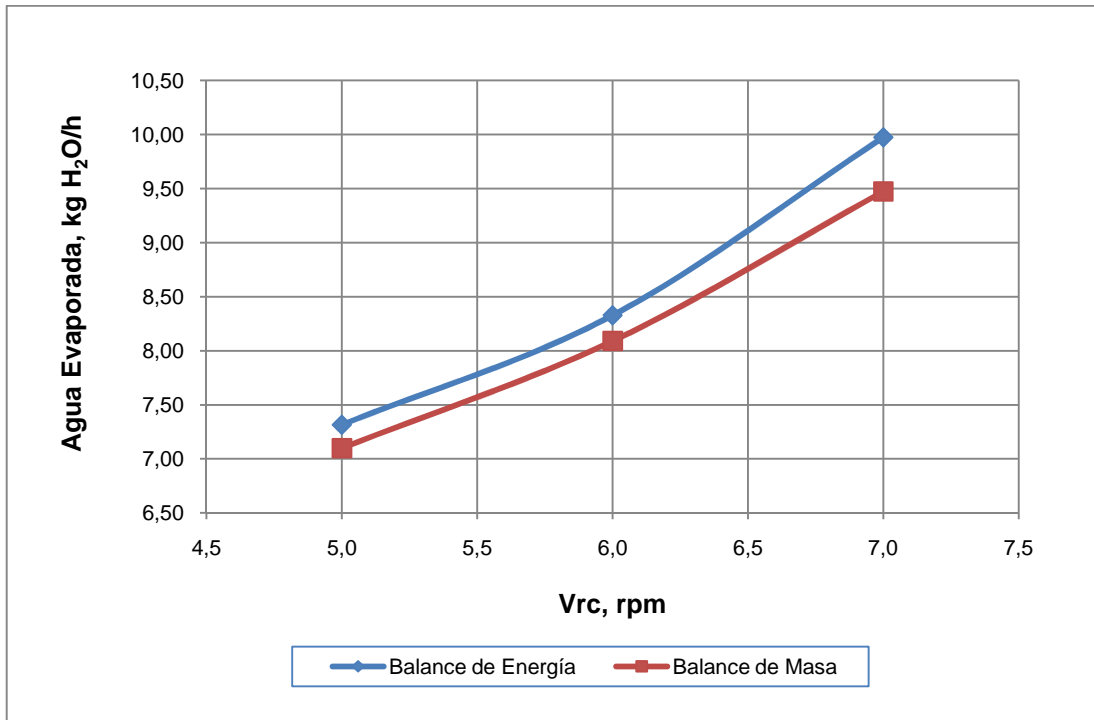
**Figura 18.** Flujo másico del agua evaporada en función de la separación entre tambores  
 $V_{rc}=6$  rpm;  $P_v=60$  psig

Por tanto, se debió concluir que el proceso de deshidratación era viable en la escala empleada en los experimentos, hasta una separación entre tambores de 0,50 mm.

### **Aumento del flujo másico de agua evaporada con el incremento de la velocidad de rotación**

La figura 19 se puede observar un aumento del flujo másico de evaporación con el aumento de las velocidades de rotación, que se debe de igual manera al incremento del flujo másico del vapor; ya que conforme se incrementó la velocidad de rotación de los tambores, el tiempo de secado (semi-batch) disminuyó; y de igual manera, al dividir el peso del condensado recolectado para

el tiempo de secado se determinó el aumento del flujo de vapor. En el numeral 3.1.7 del Anexo III se pueden apreciar los flujos de vapor.



**Figura 19.** Flujo másico del agua evaporada en función de la velocidad de rotación  
 $P_v = 60$  psig;  $b = 0,20$  mm

La comparación de resultados mediante las variaciones porcentuales relativas de los flujos másicos del agua evaporada obtenidas por el balance de masa respecto al de energía, no supera el 6%. En el numeral 2.6 del Anexo III se pueden apreciar los flujos másicos del agua evaporada con sus respectivas variaciones porcentuales relativas.

### 3.2.1.3 Velocidad de evaporación del agua o Velocidad de secado

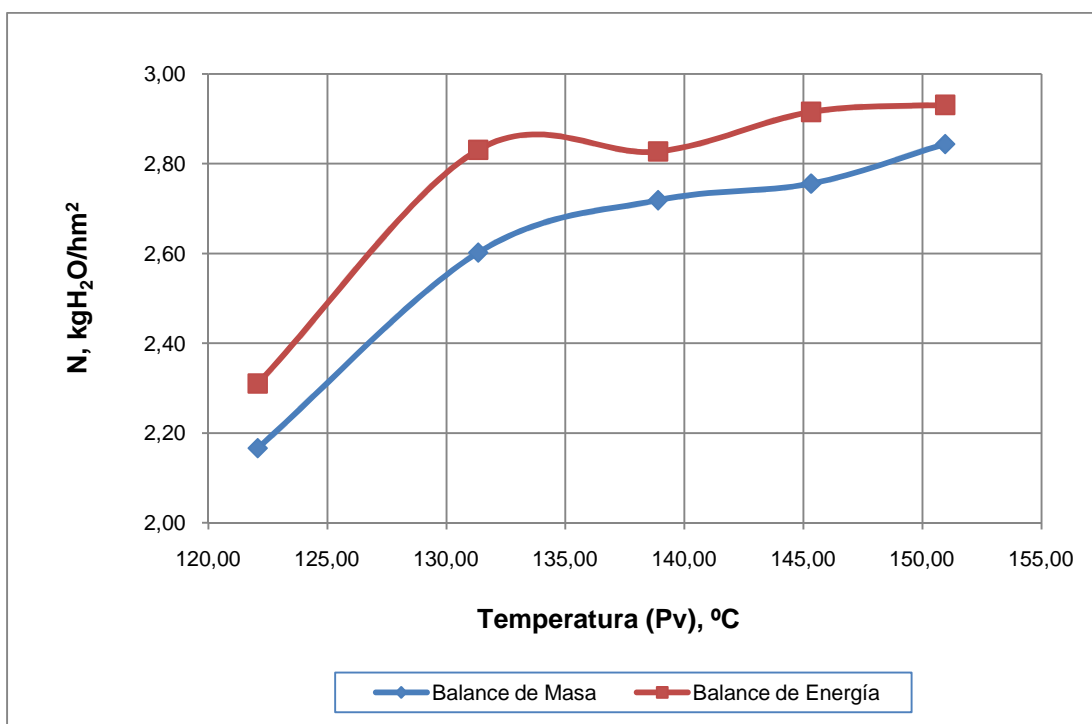
La velocidad de evaporación del agua, también es función del área de las películas deshidratadas. Se determinó que las áreas de las películas

deshidratadas experimentales fueron aproximadamente las mismas cuando se trabajó con diferentes valores de presión de vapor y velocidad de rotación.

Sin embargo, cuando se trabajó con la variable separación entre tambores, las áreas disminuyeron a medida que se incrementó la separación, pues los espesores de las películas fueron mayores. En el numeral 2.7 del Anexo III se encuentran tabuladas las áreas de las películas deshidratadas.

### Aumento de la velocidad de evaporación del agua con el incremento de la temperatura del vapor

En la figura 20 se puede observar el incremento de la velocidad de evaporación del agua conforme aumenta la temperatura del vapor, y se debe al aumento del flujo másico de evaporación del agua; pues, incrementa el flujo másico del vapor. El área de la película deshidratada se mantuvo prácticamente constante, por lo que la curva de la velocidad de evaporación presenta el mismo comportamiento cualitativo que la curva del agua evaporada.

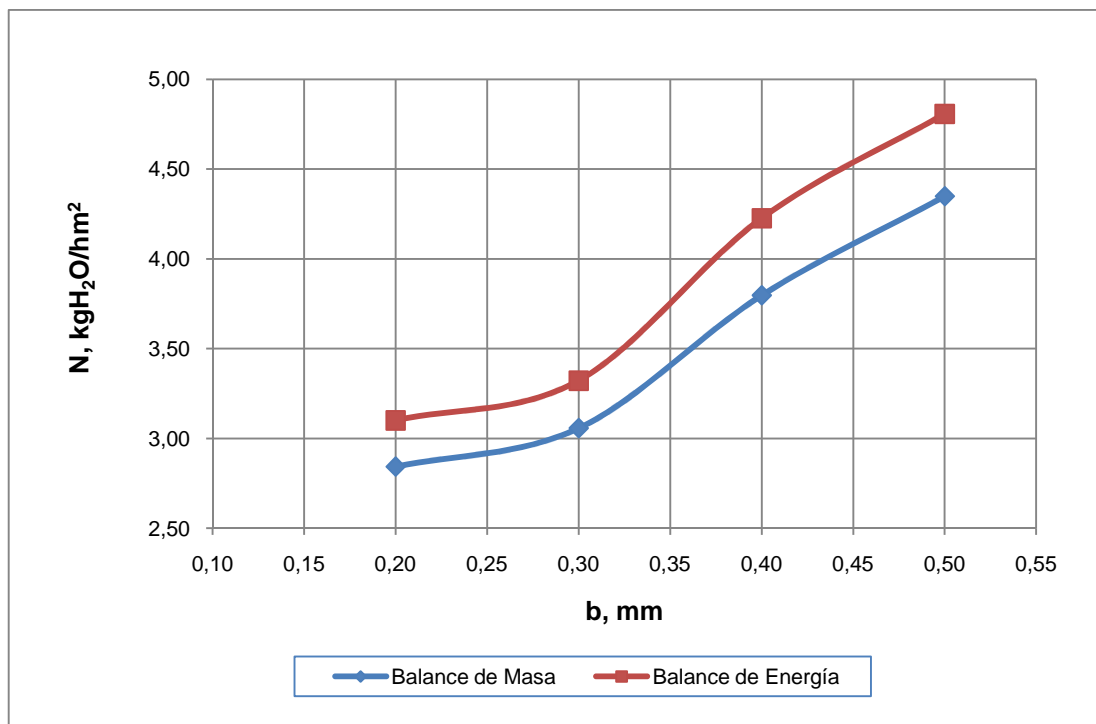


**Figura 20.** Velocidad de evaporación del agua en función de la temperatura del vapor  
Vrc=6 rpm; b=0,20 mm

### Aumento de la velocidad de evaporación del agua con el incremento de la separación entre tambores

En la figura 21 se puede ver que la velocidad de evaporación del agua en kg/h aumenta con la separación, debido al incremento del flujo másico de evaporación del agua, pues el flujo de vapor fue aumentando a medida que se incrementó la separación.

En este caso, el área de la película deshidratada decrece con el aumento de la separación, pero de igual manera la curva de la velocidad de evaporación presenta el mismo comportamiento cualitativo que la curva del agua evaporada.



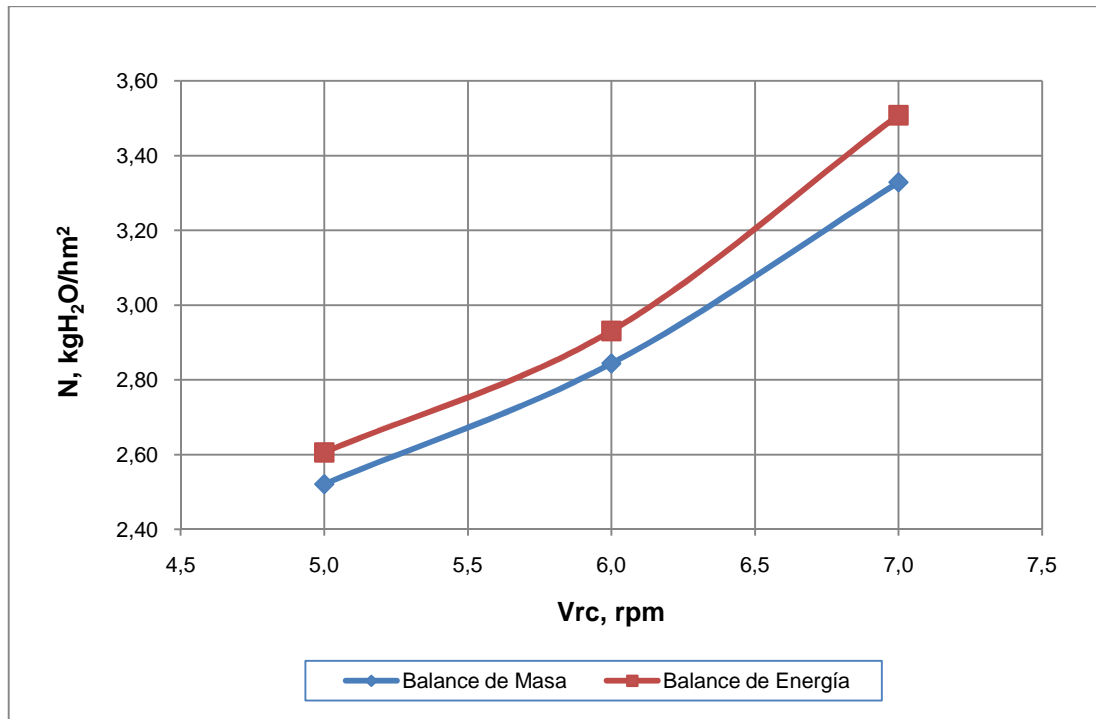
**Figura 21.** Velocidad de evaporación del agua en función de la separación entre tambores  
Vrc=6 rpm; Pv=60 psig

### Aumento de la velocidad de evaporación del agua con el incremento de la velocidad de rotación de los tambores

La figura 22 se puede observar un aumento de la velocidad de evaporación de evaporación del agua con el aumento de las velocidades de rotación, debido al

incremento del flujo másico del agua evaporada que se debe del mismo modo al incremento del consumo de vapor.

El área de la película deshidratada se conservó, y como se esperaba la curva de la velocidad de evaporación muestra un comportamiento cualitativo similar que la curva del agua evaporada.



**Figura 22.** Velocidad de evaporación del agua en función de la velocidad de rotación  
 $P_v = 60$  psig;  $b=0,20$  mm

En el numeral 2.7 del Anexo III se detallan los valores de la velocidad de evaporación del agua. Cabe mencionar, que se utilizaron las mismas áreas de secado en la determinación de las velocidades de secado en el balance de masa y energía; obteniéndose en este caso, variaciones porcentuales relativas que no superan el 8%.

El objetivo de la realización del balance de energía era calcular los flujos másicos del agua evaporada utilizando las temperaturas de la superficie de secado obtenidas por los programas en las pérdidas convectivas, se comparó dichos flujos con los flujos determinados por el balance de masa mediante la variación

porcentuales relativa, y de acuerdo a los resultados obtenidos, estas variaciones no exceden el 10%; sin embargo, se consideró que los flujos máxicos del agua obtenidos en el balance de masa eran los más factibles de ser utilizados en el programa SETA II, por ser experimentales en su totalidad.

### **3.3 DISEÑO DEL SOFTWARE PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE UN SECADOR DE DOBLE TAMBOR**

Para comprobar el funcionamiento de los programas SETA I y SETA II, se ejecutaron los programas con los resultados obtenidos de las pruebas experimentales (los que se utilizan como parámetros de entrada). Los resultados de las pruebas experimentales permitieron también determinar los coeficientes de transferencia de calor, la velocidad del aire circundante, la humedad inicial y final; y los flujos máxicos que se utilizaron en los programas; y se los puede encontrar tabulados en el Anexo III.

Para el diseño de los programas se consideraron dos etapas, de acuerdo a los algoritmos: (1) La primera, englobó a las ecuaciones de diseño para el cálculo de la velocidad de evaporación del agua y la temperatura de la superficie de secado; (2) La segunda, abarcó la estimación de las dimensiones del secador, para lo cual, se calculó el área de la película deshidratada, con el flujo máxico del agua evaporada calculado en el caso de SETA I, o con el flujo máxico introducido en el caso de SETA II, de acuerdo a los tipos de programa respectivamente, de los cuales se estima el área nominales de los tambores, que sirvió para obtener la longitud y el diámetro de un tambor del secador.

#### **3.3.1 TEMPERATURA DE LA SUPERFICIE DE SECADO**

La temperatura de la superficie de secado no se midió experimentalmente debido a que no se disponía de sensores infrarrojos cuando se realizó las pruebas de

deshidratación, por lo que el presente Proyecto de Titulación, no puede ofrecer evidencia directa a este respecto.

Las temperaturas de la superficie de secado se obtuvieron de las ecuaciones de diseño que involucran la transferencia de calor, que se encuentran influenciadas principalmente por la presión de vapor del medio de calentamiento, la velocidad del aire circundante y el coeficiente de transferencia de calor de la película de banano.

La presión de vapor es un parámetro importante debido a que determina la diferencia de temperatura entre la pared del tambor y la temperatura de la superficie de secado, como se manifestó ya en el numeral 3.2.1.1

Por otra parte, se estimó un valor medio de la velocidad del aire circundante de 0,015 m/s, que fue utilizado como valor referencial único de la velocidad del aire en los programas. Este valor de velocidad, que en la práctica implica condiciones de convección natural, fue estimado a partir de la velocidad de evaporación del agua determinada en los experimentos.

La velocidad del aire tiene una gran influencia en la estimación tanto de la velocidad de evaporación del agua, como en la de la temperatura de la superficie de secado para todas las condiciones de operación; pues, si las condiciones fueran de convección forzada, incrementos de la velocidad del aire, aumentan el número de  $Re$ , en consecuencia se produce un aumento en el valor del coeficiente de transferencia de calor por convección. Además, el coeficiente de transferencia de calor por la evaporación, de acuerdo a las ecuaciones de diseño, también incrementaría.

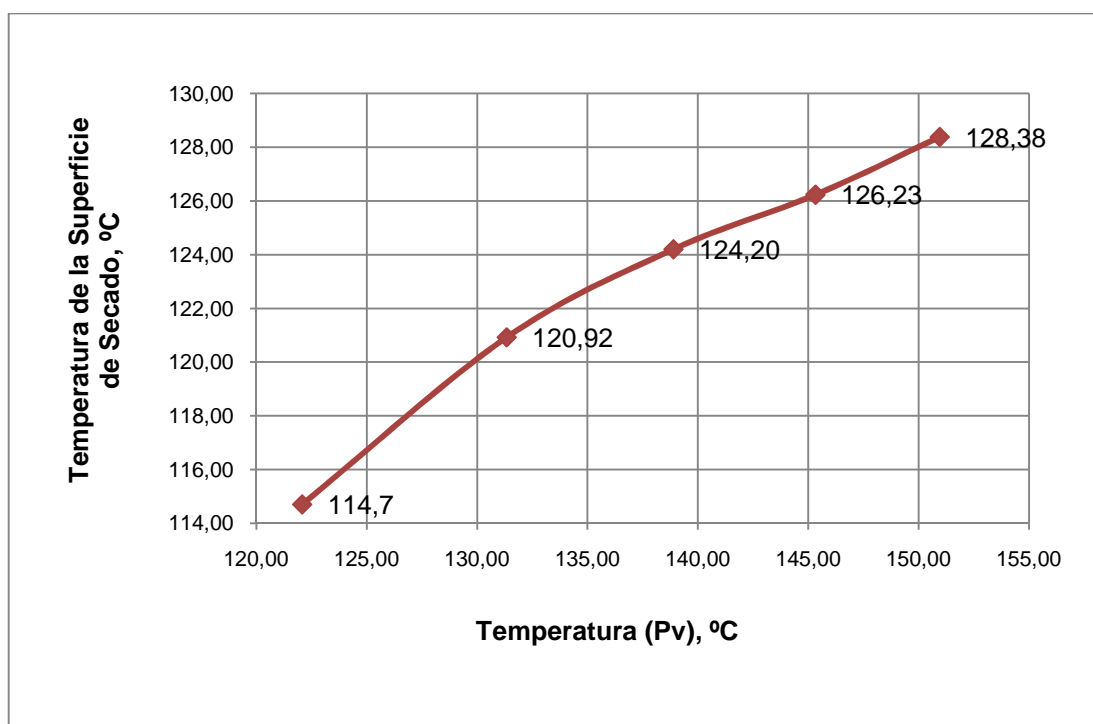
Por otro lado, el coeficiente de transferencia de calor de la película de banano se determinó con base en los resultados de las pruebas de deshidratación, pudiéndose determinar, que éste varía de acuerdo a las condiciones operativas (Presión de vapor del medio de calentamiento, separación y velocidad de rotación de los tambores); como se detalla en el numeral 4.1.3 del Anexo II.



Como se manifestó en el capítulo uno, el coeficiente de transferencia de calor por conducción es función de la velocidad de evaporación del agua experimental y la temperatura del vapor. Por tanto, el coeficiente de transferencia de calor de película depende de las condiciones operativas del secador; no obstante, también depende del coeficiente de transferencia de calor debido al contacto entre la pared del secador y la película del material a secar (resistencia de contacto).

### Aumento de la temperatura de la superficie de secado con el aumento de la temperatura del vapor

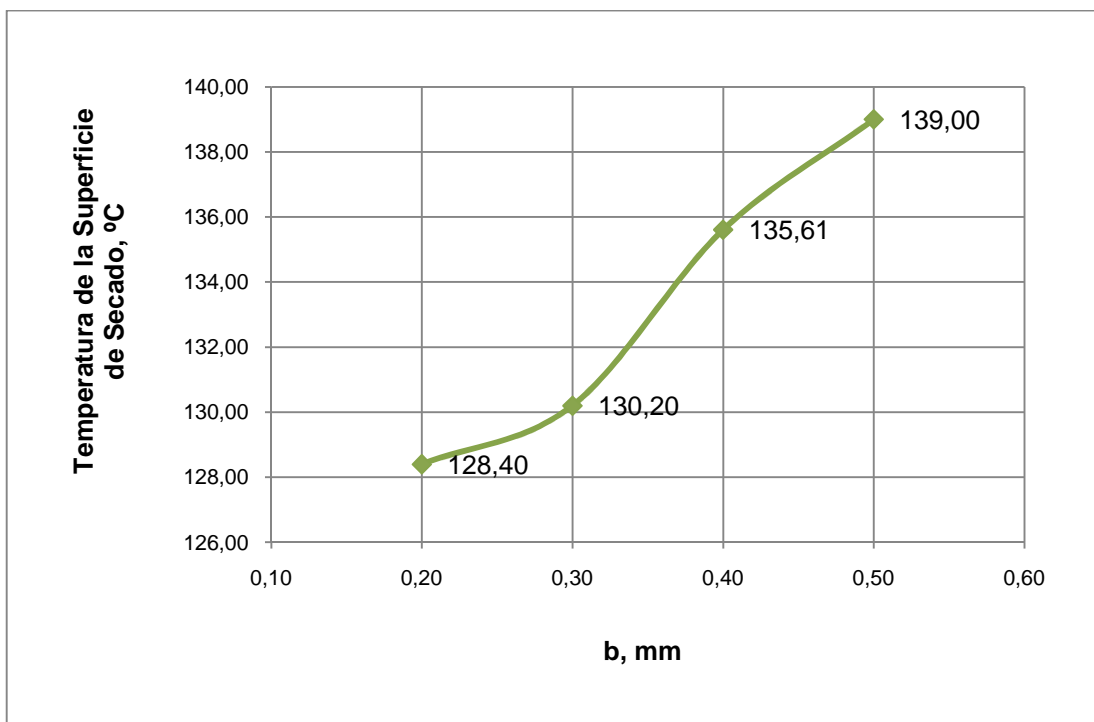
Conforme la temperatura del vapor aumenta, incrementa el consumo del vapor; que promueve el incremento en la temperatura de la pared del tambor, y ocasiona el aumento de la temperatura de la superficie de secado como se puede ver en la figura 23.



**Figura 23.** Temperatura de la superficie de secado en función de la temperatura del vapor  
Vrc=6 rpm; b=0,20 mm

### Aumento de la temperatura de la superficie de secado con el aumento de la separación entre tambores

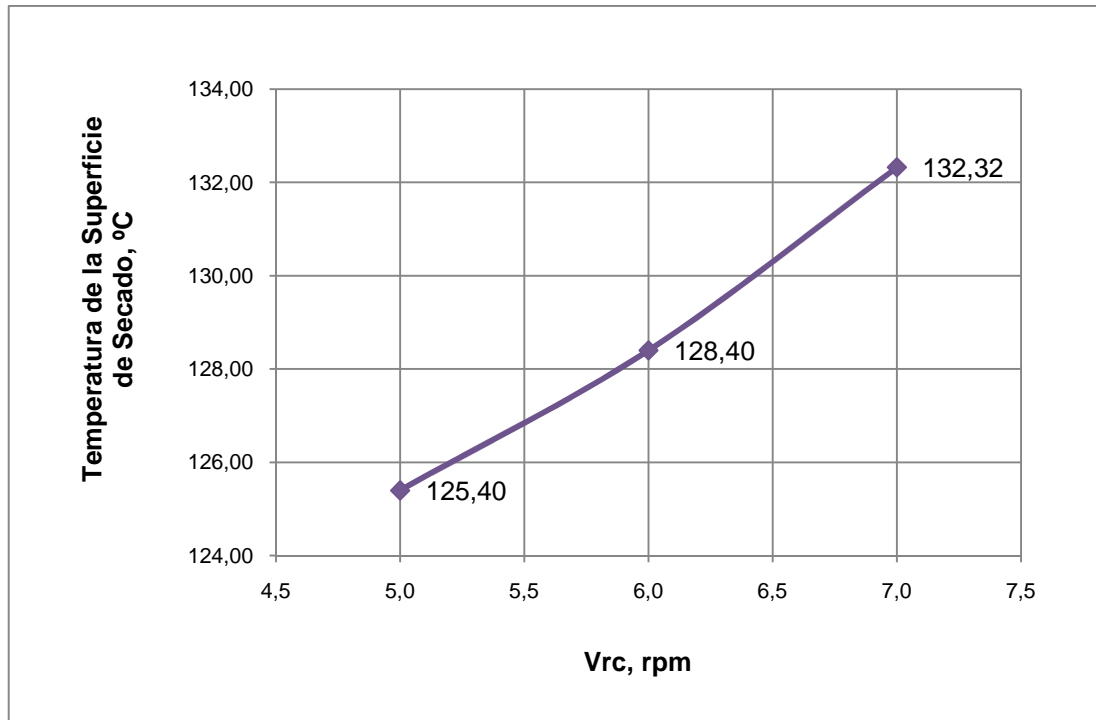
A medida que aumenta la separación entre tambores, se produce un incremento en el consumo del vapor; promoviendo el aumento de la temperatura de la pared del tambor, con el consecuente aumento de la temperatura de la superficie de secado como se puede observar en la figura 24.



**Figura 24.** Temperatura de la superficie de secado en función de la separación entre tambores:  $V_{rc}=6$  rpm;  $P_v=60$  psig

### Aumento de la temperatura de la superficie de secado con el aumento de la velocidad de rotación de los tambores

El incremento de la velocidad de rotación de los tambores, produjo un incremento en el flujo másico del vapor; haciendo que la temperatura de la pared del tambor aumente, e incremente subsecuentemente, la temperatura de la superficie de secado como se aprecia en la figura 25.



**Figura 25.** Temperatura de la superficie de secado en función de la velocidad de rotación  
 $P_v = 60$  psig;  $b = 0,20$  mm

En el numeral 3.1.2 y 3.1.7 del Anexo III se presentan los valores de la temperatura de la superficie de secado y los flujos de vapor respectivamente.

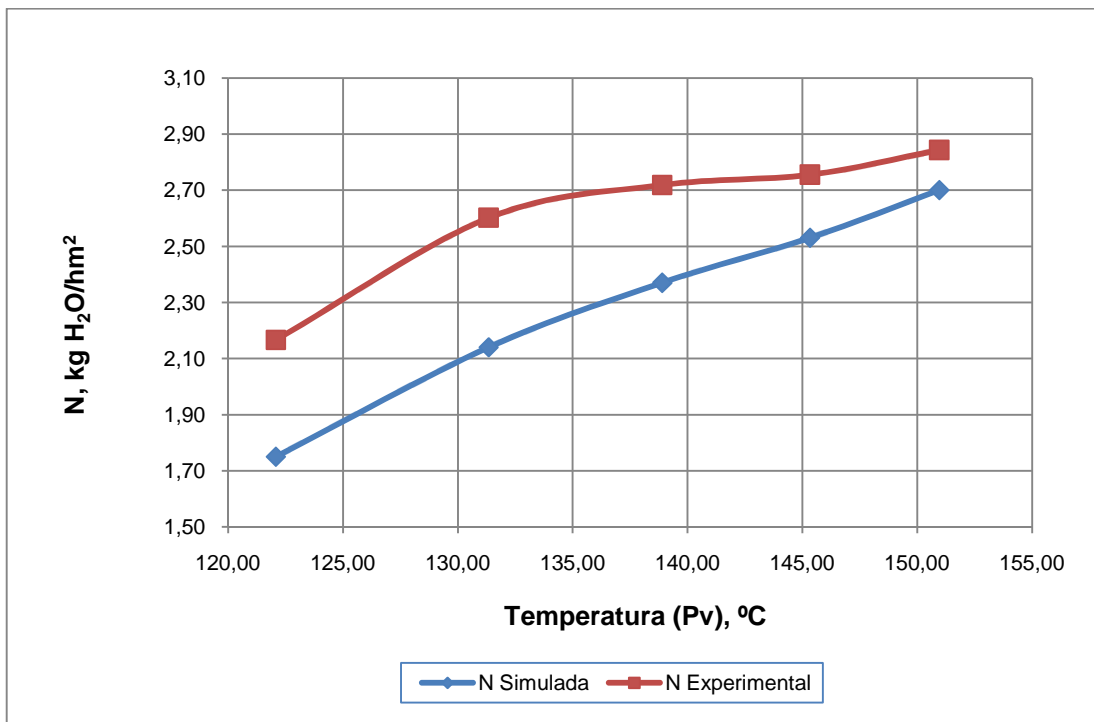
### 3.3.2 VELOCIDAD DE EVAPORACIÓN DEL AGUA

La velocidad de evaporación del agua simulada es función de la velocidad del aire y de la diferencia entre la presión de vapor del agua a la temperatura de la superficie de secado y la presión parcial del agua en el aire.

En las figuras 26, 27 y 28 se presentan las curvas de las velocidades de evaporación del agua. En ellas se puede notar que los resultados simulados presentan el mismo comportamiento que los resultados experimentales.

### Aumento de la velocidad de evaporación del agua con el aumento de la temperatura del vapor

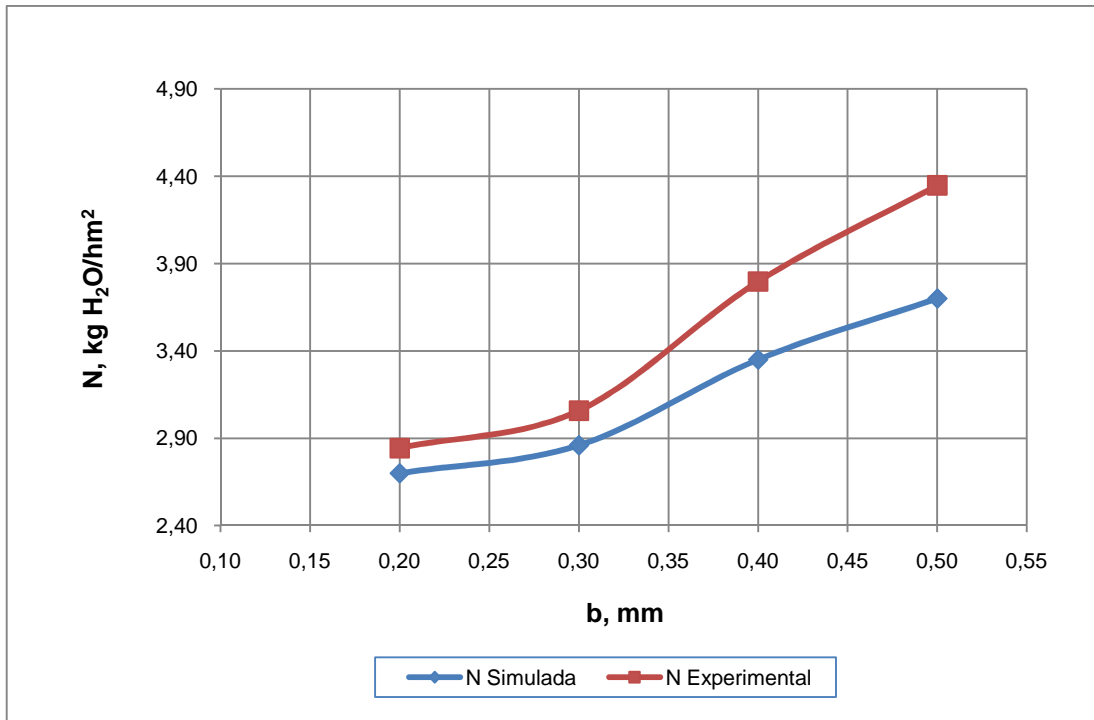
La presión de vapor del agua se incrementa con el aumento de la temperatura de la superficie de secado, y consecuentemente se produce el incremento de la velocidad de evaporación del agua como se muestra en la figura 26.



**Figura 26.** Velocidad de evaporación del agua en función de la temperatura del vapor  
Vrc=6 rpm; b=0,20 mm

### Aumento de la velocidad de evaporación del agua con el aumento de la separación entre tambores

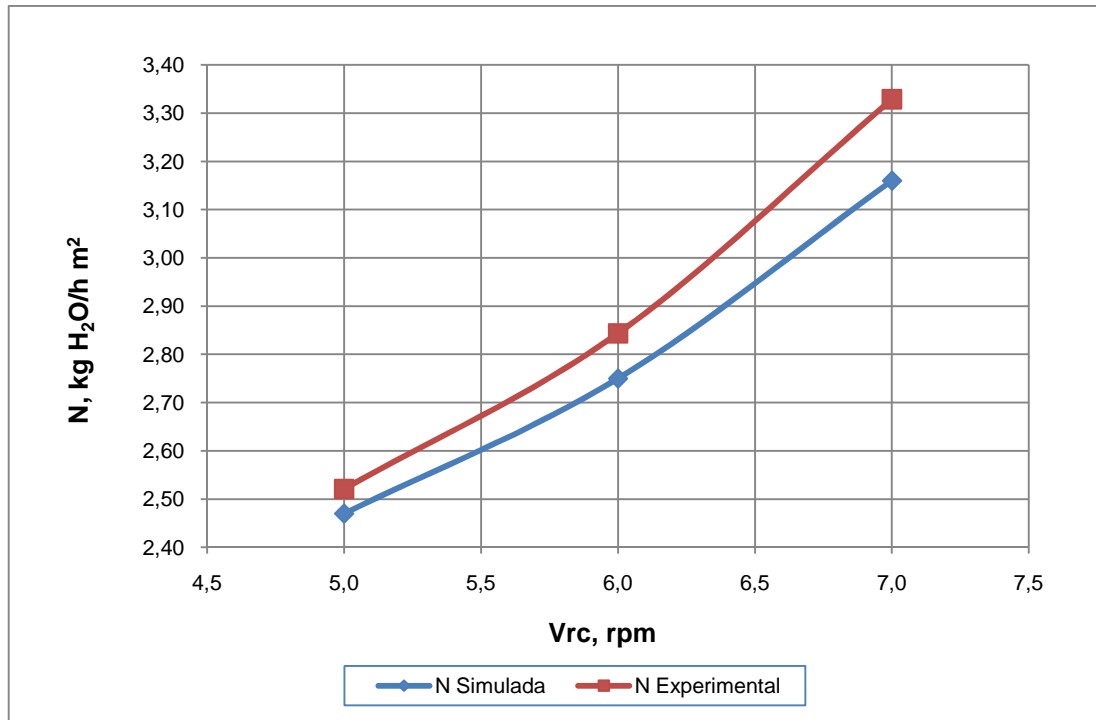
Con el aumento de la temperatura de la superficie de secado, se incrementa la presión de vapor del agua; y por ende, aumenta la velocidad de evaporación del agua como se muestra en la figura 27.



**Figura 27.** Velocidad de evaporación del agua en función de la separación entre tambores  
Vrc=6 rpm; Pv=60 psig

### **Aumento de la velocidad de evaporación del agua con el aumento de la velocidad de rotación de los tambores**

En la figura 27 se puede apreciar que a medida que aumenta la temperatura de la superficie de secado aumenta la velocidad de evaporación del agua debido a que se incrementa la presión de vapor del agua por el aumento de la  $T_{ss}$ .



**Figura 28.** Velocidad de evaporación del agua en función de la velocidad de rotación  
 $P_v = 60$  psig;  $b = 0,20$  mm

Es importante mencionar, que el coeficiente de transferencia de calor de la película también es función del coeficiente de transferencia de calor entre la pared del tambor y la película, el cual se consideró constante para todas las condiciones de operación; y fue tomado de referencias bibliográficas de acuerdo a lo manifestado en el numeral 4.1.3 del Anexo II; no obstante, no fue posible establecer un estudio acerca del mismo.

De acuerdo a lo expuesto, el coeficiente de transferencia de calor de la película al ser específico para cada condición, es el parámetro que determina el valor de convergencia de la temperatura de la superficie de secado, y por ende el valor de la estimación de la velocidad de evaporación del agua.

La fluctuación de las variaciones porcentuales se debe a los parámetros que influyeron en la determinación de las velocidades de evaporación. En el numeral 3.1.1 del Anexo III se muestran las variaciones porcentuales relativas de las velocidades simuladas respecto a las experimentales.

### **3.3.3 FLUJO MÁSSICO DEL AGUA EVAPORADA Y FLUJO MÁSSICO DE PRODUCCIÓN**

La segunda etapa de los programas desarrollados se realizó sobre la base del flujo másico y la velocidad de evaporación del agua y, porque con estos resultados se puede hallar el área de secado, de la que se derivan el resto de resultados.

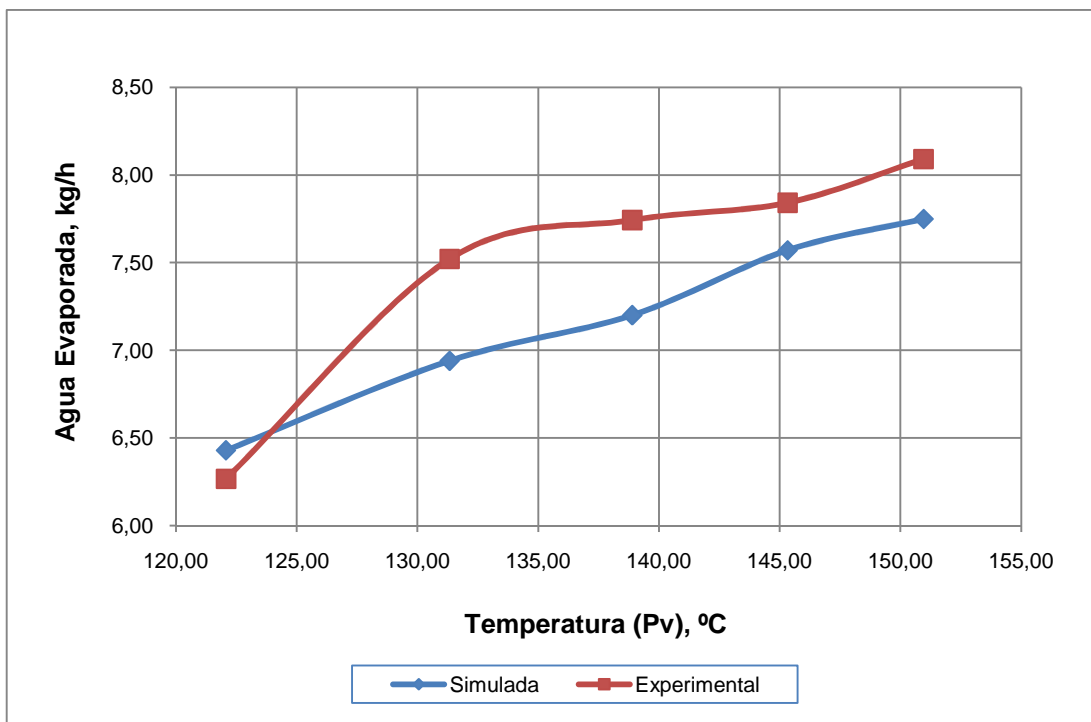
La diferencia de los programas SETA I y SETA II radica en la segunda etapa, por la utilización, ya sea del flujo másico de producción en el caso de SETA I, o del flujo másico del agua evaporada en el caso de SETA II, como parámetro de entrada respectivamente, manteniendo el resto de parámetros constantes.

#### **3.3.3.1 Flujo másico del agua evaporada**

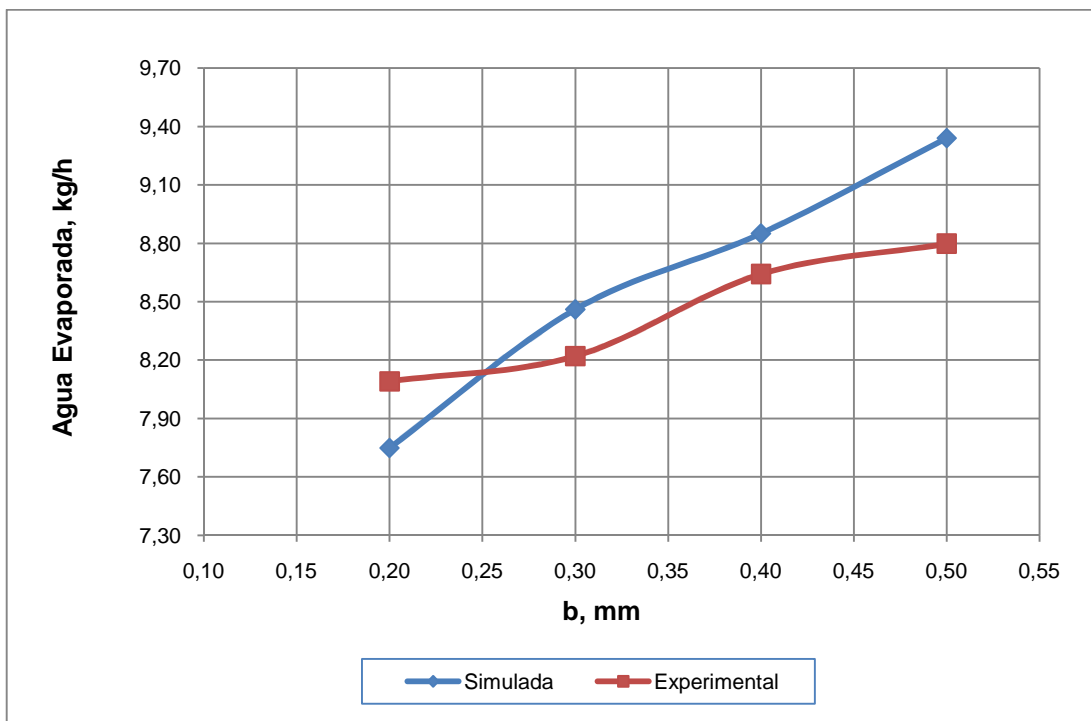
En la segunda etapa de SETA I, el flujo másico del agua evaporada se estimó sobre la base de: el flujo másico de producción, y las humedades inicial y final.

Los resultados del programa presentan variaciones porcentuales relativas respecto a los resultados experimentales, como se puede observar en el numeral 3.1.3 del Anexo III, estas variaciones no superan el 11%, y se deben a que los flujos experimentales también dependen del flujo másico de alimentación, cabe recordar que la deshidratación fue un proceso manual.

En las figuras 30, 31 y 32 se puede ver que las curvas de los flujos másicos del agua evaporada tienen la misma tendencia. Se puede revisar el numeral 3.2.1.2, donde se dieron mayores detalles acerca de las tendencias crecientes de los flujos.

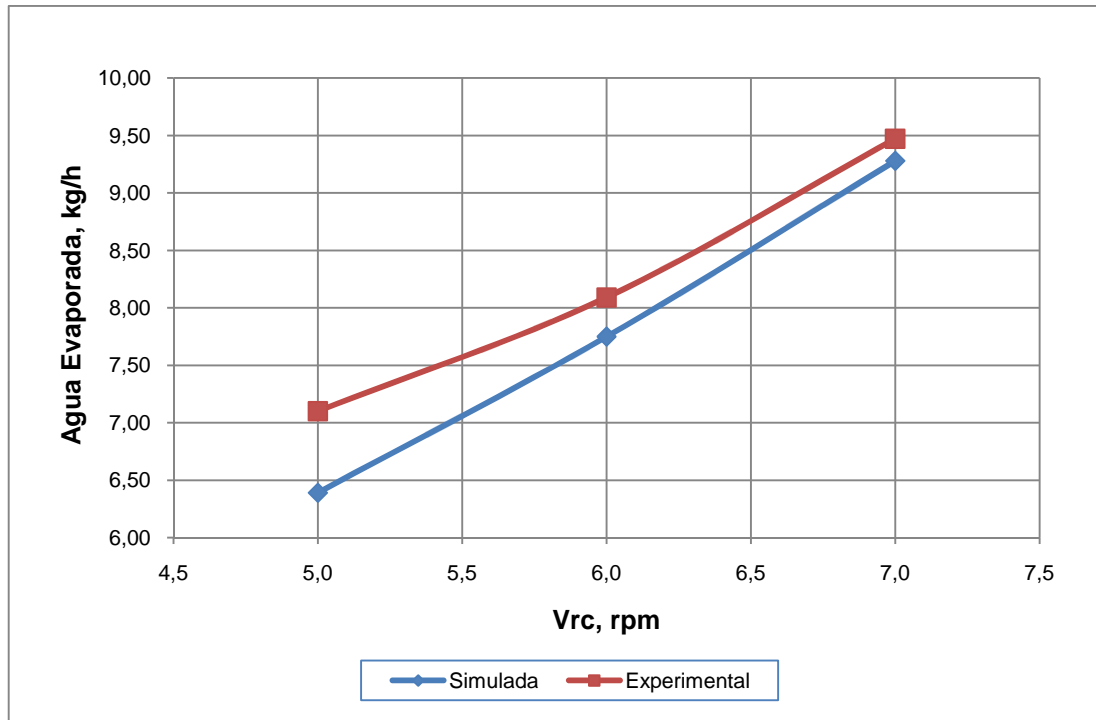


**Figura 29.** Flujo másico del agua evaporada en función de la temperatura del vapor  
Vrc=6 rpm; b=0,20 mm



**Figura 30.** Flujo másico del agua evaporada en función de la separación entre tambores  
Vrc=6 rpm; Pv=60 psig





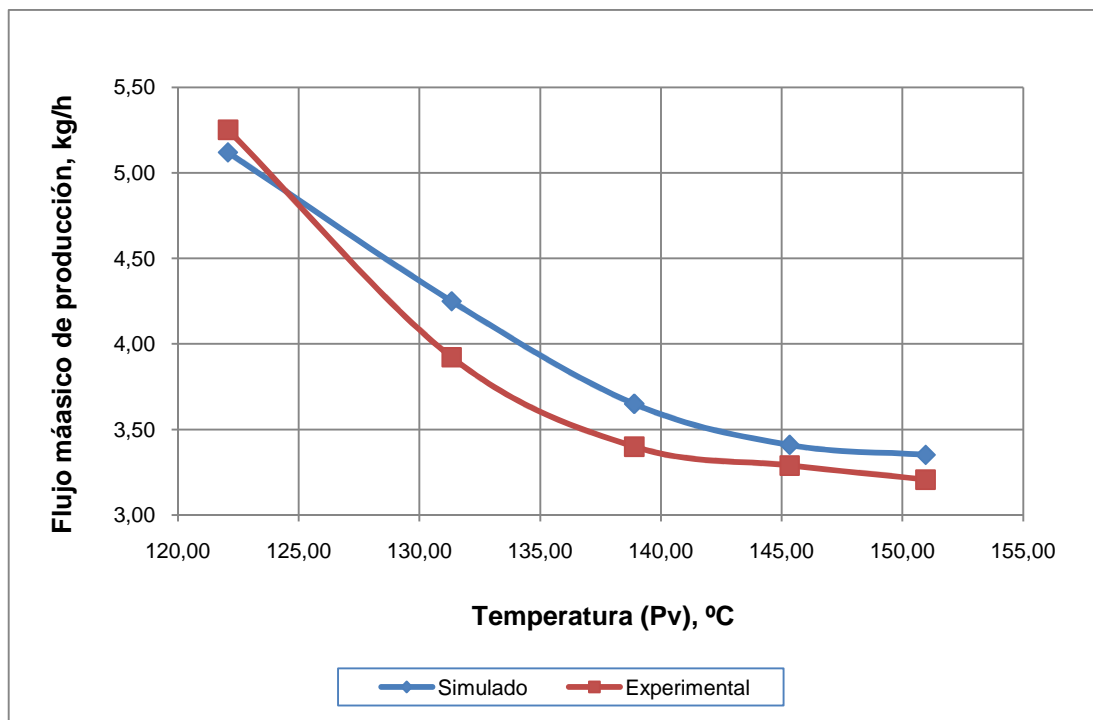
**Figura 31.** Flujo másico del agua evaporada en función de la velocidad de rotación  
 $P_v = 60$  psig;  $b=0,20$  mm

### 3.3.3.2 Flujo másico de producción

La segunda etapa de SETA II se desarrolló sobre la base del flujo másico del agua evaporada, y de las humedades inicial y final.

#### **Aumento del flujo másico de producción con el aumento de la temperatura del vapor**

Se puede apreciar en la figura 32 la disminución del flujo másico con el incremento de la temperatura del vapor; pues a medida que se incrementa la temperatura del vapor, la película deshidratada obtenida es más seca, por tanto, al final del proceso de secado el peso será menor, para un tiempo de secado aproximadamente constante.



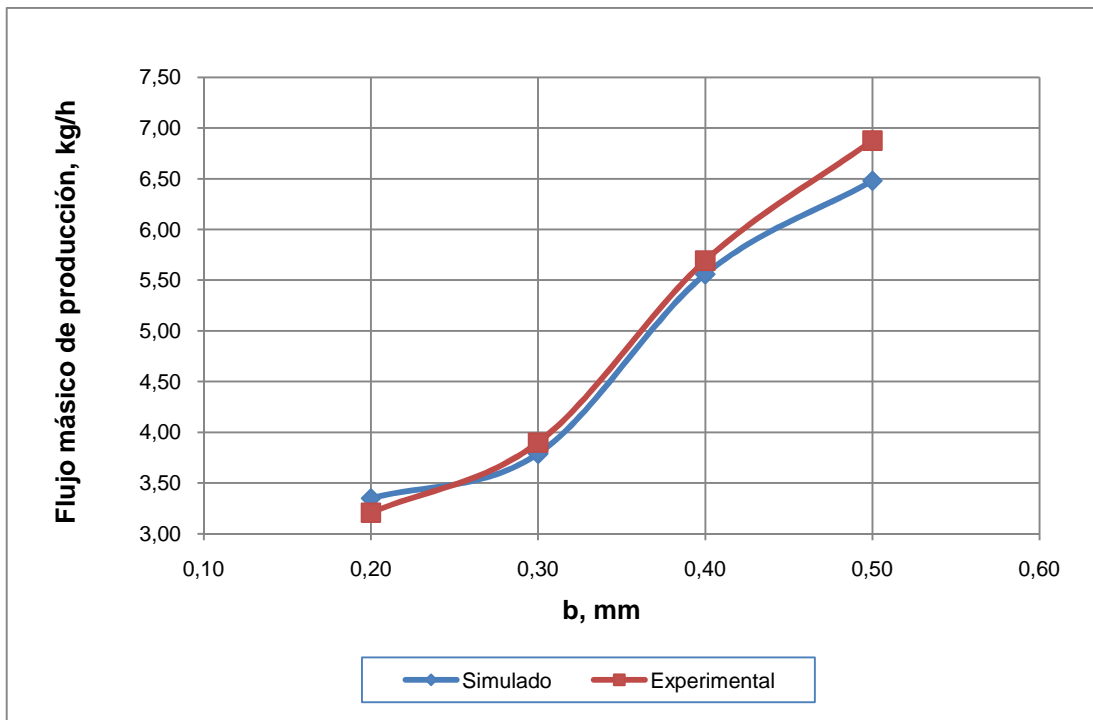
**Figura 32.** Flujo másico de producción en función de la temperatura del vapor  
 $V_{rc}=6$  rpm;  $b=0,20$  mm

### **Aumento del flujo másico de producción con el aumento de la separación entre tambores**

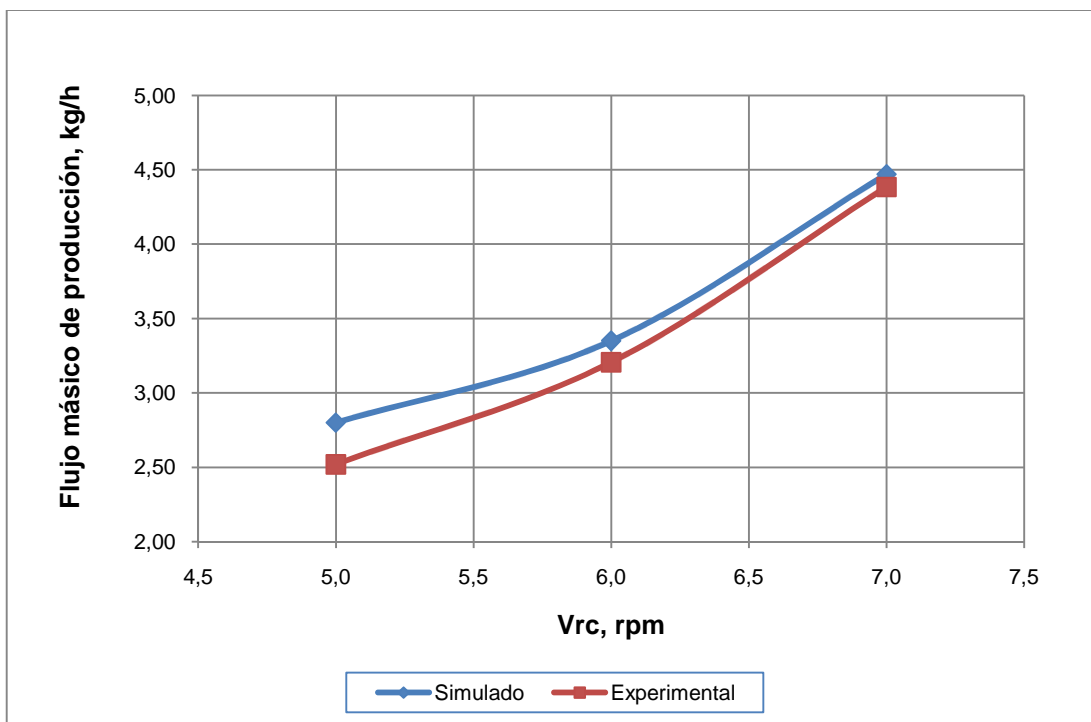
Por el contrario la figura 33 se observa un incremento del flujo másico de producción a medida que la separación entre tambores es mayor, debido al incremento de la humedad final, pues el tiempo de secado disminuye; generando que el peso de la película deshidratada sea mayor.

### **Aumento del flujo másico de producción con el aumento de la velocidad de rotación de los tambores**

Por otro lado, en la figura 34 se puede ver que al aumentar la velocidad de rotación de los tambores, el flujo de producción aumenta; ya que, la humedad final del producto aumenta, debido a que disminuye el tiempo de secado, ocasionando que la película deshidratada tenga un peso mayor.



**Figura 33.** Flujo másico de producción en función de la separación entre tambores  
 $V_{rc}=6$  rpm;  $P_v=60$  psig



**Figura 34.** Flujo másico de producción en función de la velocidad de rotación  
 $P_v = 60$  psig;  $b=0,20$  mm

En el numeral 3.1.4 del Anexo III se presentan los flujos másicos de producción con sus respectivas variaciones porcentuales. En este caso, las variaciones porcentuales relativas no superan el 10%. Estas variaciones se deben a que los flujos experimentales se determinaron directamente de los pesos de las películas deshidratadas divididas para sus respectivos tiempos de secado.

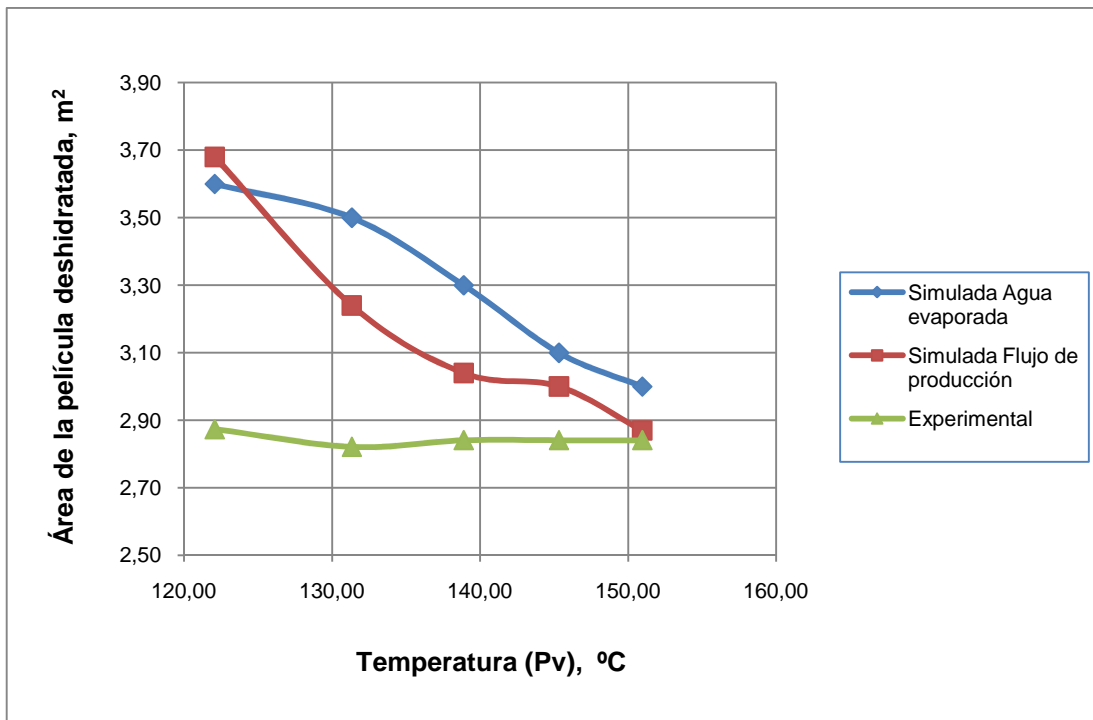
### **3.3.4 ÁREA DE LA PELÍCULA DESHIDRATADA**

El área de la película deshidratada simulada se obtuvo de la relación entre el flujo másico del agua evaporada y la velocidad de evaporación del agua. Tal como se manifestó, tanto el flujo másico del agua evaporada como la velocidad de evaporación presentaron tendencias crecientes; no obstante, las curvas de las áreas de las películas deshidratadas de las figuras 35 y 36 presentan tendencias descendentes, debido a que la relación entre el flujo másico y la velocidad de evaporación del agua disminuye; en cambio en la figura 37 se observa una tendencia creciente, porque la relación entre el flujo y la velocidad aumenta.

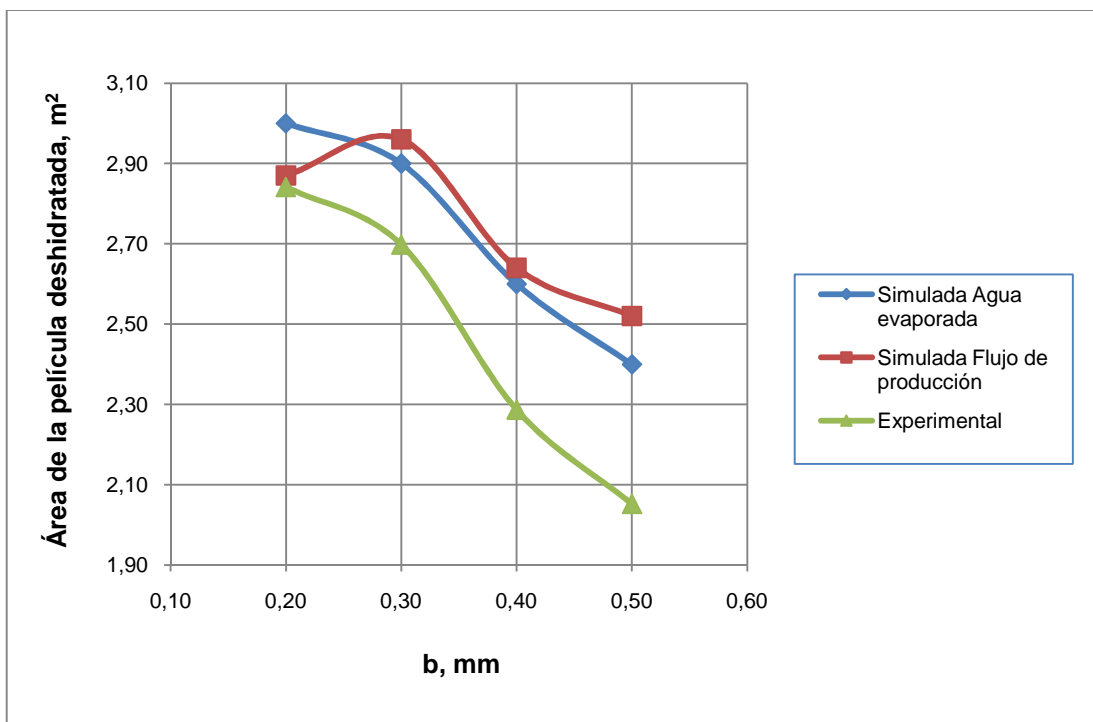
En el numeral 3.1.5 del Anexo III, se pueden observar las áreas simuladas y las experimentales con sus respectivas variaciones porcentuales.

Las variaciones de las áreas simuladas respecto a las experimentales, se deben a que las áreas experimentales se determinaron a partir de la velocidad de rotación de los tambores y del tiempo de secado.

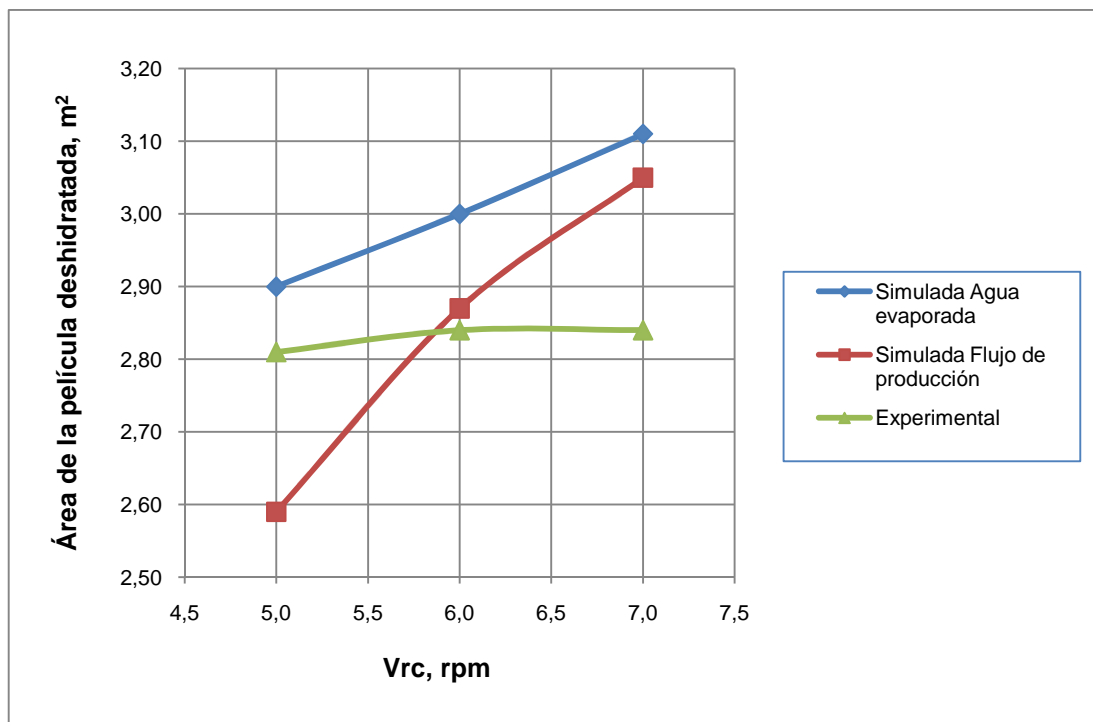
La nomenclatura respecto a: Simulada Agua evaporada, se refiere al área determinada cuando el flujo de agua evaporada es el parámetro de entrada; y, al contrario, Simulada Flujo de producción, se refiere a que es el flujo másico de producción el parámetro de entrada; en cada uno de los programas respectivamente.



**Figura 35.** Área de la película deshidratada en función de la temperatura del vapor  
Vrc=6 rpm; b=0,20 mm



**Figura 36.** Área de la película deshidratada en función de la separación entre tambores  
Vrc=6 rpm; Pv=60 psig



**Figura 37.** Área de la película deshidratada en función de la velocidad de rotación  
 $P_v = 60$  psig;  $b = 0,20$  mm

### 3.3.5 ÁREA NOMINAL DE LOS TAMBORES DEL SECADOR

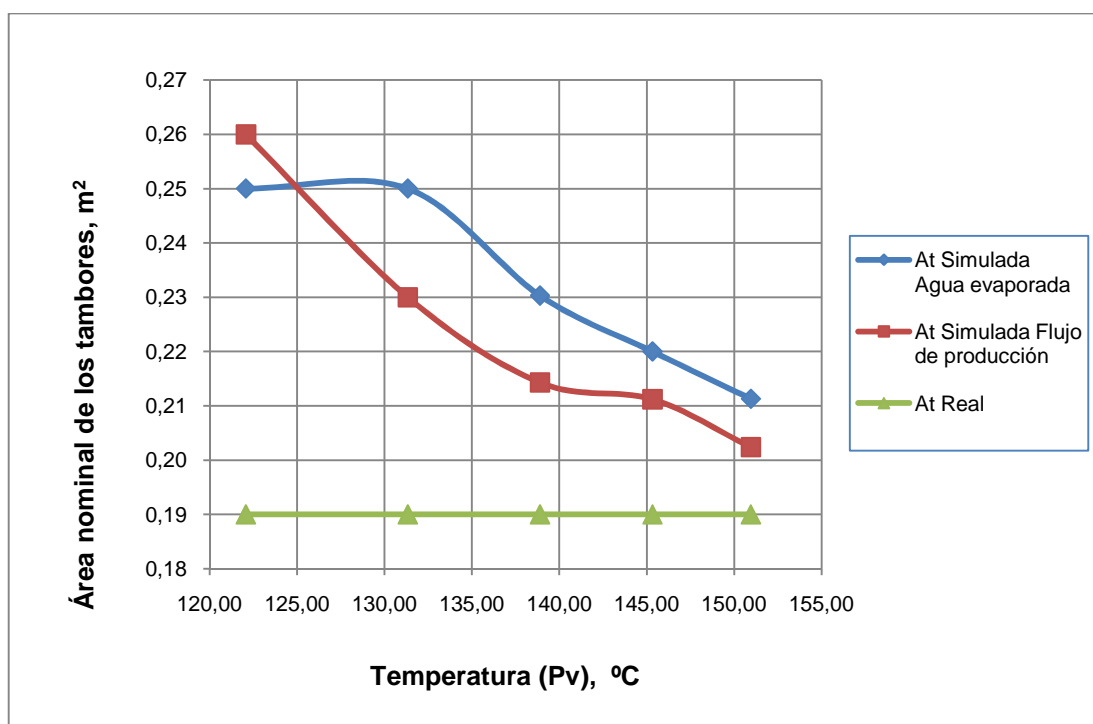
Con base en el área de la película deshidratada y el factor de área se halló el área nominal de los tambores.

El factor de área se determinó utilizando el promedio del número de revoluciones, y el ángulo de contacto (ángulo del arco del secador que se encuentra en contacto con la superficie de la película deshidratada). Por tanto, el factor de área es un valor constante que consideró el mismo número de revoluciones para todas las condiciones; sin embargo, se debe recordar que cuando se trabajó con la separación entre tambores, el número de revoluciones fue menor conforme se incrementaba esta variable, por lo que se espera, que las áreas nominales simuladas presenten cierta variación relativa respecto al área nominal real.

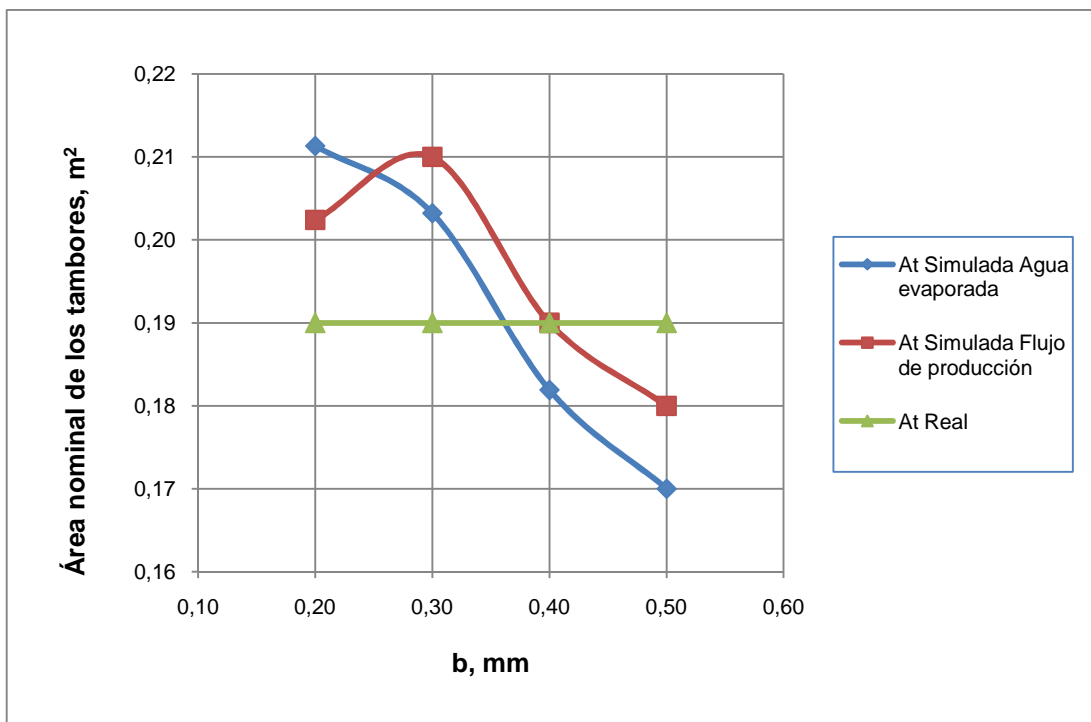
Tal como se esperaba las curvas de las áreas de los tambores presentan un comportamiento cualitativo similar a las curvas de las áreas de las películas deshidratada, como se puede apreciar en las figuras 38, 39 y 40.

La nomenclatura respecto a: A Simulada Agua evaporada, se refiere al área nominal de los tambores determinada cuando el flujo de agua evaporada es el parámetro de entrada; y, al contrario, A Simulada Flujo de producción, se refiere a que es el flujo másico de producción el parámetro de entrada; en cada uno de los programas respectivamente.

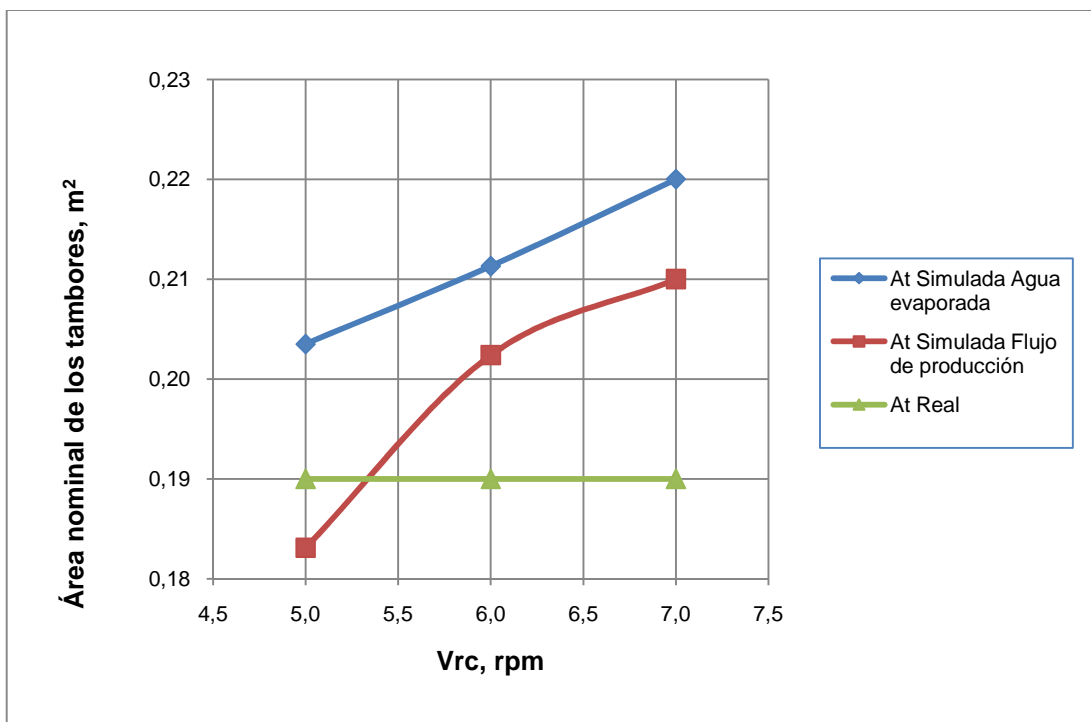
En el numeral 3.1.6 del Anexo III se pueden revisar las áreas nominales obtenidas por los programas con sus respectivas variaciones porcentuales. Estas variaciones, corresponden a que las áreas simuladas son función del área de la película deshidratada y el factor de área; mientras que el área real es constante para todas las condiciones de operación.



**Figura 38.** Área nominal de los tambores en función de la temperatura del vapor  
Vrc=6 rpm; b=0,20 mm



**Figura 39.** Área nominal de los tambores en función de la separación entre tambores  
Vrc=6 rpm; Pv=60 psig



**Figura 40.** Área nominal de los tambores en función de la velocidad de rotación  
Pv = 60 psig; b=0,20 mm



Se realizó un contraste de hipótesis para muestras pequeñas, mediante el cálculo de diferencia de medias, que permitió establecer si las diferencias entre las áreas simuladas y el área real eran significativas.

De acuerdo a las tablas 6 y 7 los coeficientes de significación se encuentran por debajo de los coeficientes críticos; por lo tanto, se acepta la “Hipótesis Cero”,  $H_0$  de igualdad de grupos; pues, se determinó que no hay diferencia significativa entre ellos.

Donde la Hipótesis cero: Áreas de los tambores simuladas=Área real de los tambores.

Por tanto, las áreas nominales simuladas se consideraron adecuadas para determinar las dimensiones del secador de doble tambor utilizado en el presente Proyecto de titulación.

**Tabla 6.** Coeficientes de Significación: Área nominal de los tambores  
Parámetro de entrada: Flujo másico de producción; SETA I

Variables		Pv, psig	b, mm	Vrc, rpm
Grados de libertad		8	8	6
A <sub>t</sub> Simulada, m <sup>2</sup>		0,22 ± 0,05	0,18 ± 0,06	0,20 ± 0,09
A <sub>t</sub> Real, m <sup>2</sup>		0,19 ± 0,00	0,19 ± 0,00	0,19 ± 0,00
Coeficientes de Significación	t <sub>c</sub> 0,995	3,36	3,36	4,6
	t <sub>e</sub>	1,23	0,16	0,12

**Tabla 7.** Coeficientes de Significación: Área nominal de los tambores  
Parámetro de entrada: Flujo másico del agua evaporada; SETA II

Variables		Pv, psig	b, mm	Vrc, rpm
Grados de libertad		8	8	6
A <sub>t</sub> Simulada, m <sup>2</sup>		0,23 ± 0,04	0,19 ± 0,04	0,21 ± 0,06
A <sub>t</sub> Real, m <sup>2</sup>		0,19 ± 0,00	0,19 ± 0,00	0,19 ± 0,00
Coeficientes de Significación	t <sub>c</sub> 0,995	3,36	3,36	4,6
	t <sub>e</sub>	2,04	0,12	0,54

### 3.3.6 LONGITUD Y DIÁMETRO DEL SECADOR

Se estimó la longitud y el diámetro del secador utilizado en los experimentos sobre la base de las áreas nominales de los tambores simuladas del numeral 3.3.5 y de la relación longitud/diámetro que se obtuvo de las dimensiones reales del secador, que fue  $L/D=1,85$ .

En las siguientes tablas se presentan los diámetros y las longitudes simuladas, y las variaciones porcentuales relativas para las diferentes condiciones operativas, cuando el parámetro de entrada es el flujo másico de producción SETA I.

Se puede apreciar que las variaciones porcentuales de los resultados simulados respecto a los reales presentan un comportamiento cualitativo similar a las variaciones obtenidas con las áreas de los tambores.

**Tabla 8.** Diámetros y Longitudes del secador:  $V_{rc}=6$  rpm;  $b=0,20$  mm; Variable= $P_v$   
Parámetro de entrada: Flujo másico de producción

P <sub>v</sub>	T <sub>v</sub>	A <sub>t</sub> Simulada	A <sub>t</sub> Real	Variación porcentual relativa	Diámetro, m		Variación porcentual relativa
					D simulado	D real	
psig	°C	m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	%			%
20 ± 0,5	122,07	0,26	0,19	26,92	0,149	0,127	14,77
30 ± 0,5	131,33	0,23	0,19	17,39	0,140	0,127	9,29
40 ± 0,5	138,89	0,21	0,19	9,52	0,136	0,127	6,62
50 ± 0,5	145,33	0,21	0,19	9,52	0,135	0,127	5,93
60 ± 0,5	150,95	0,20	0,19	5,00	0,132	0,127	3,79
P <sub>v</sub>	T <sub>v</sub>	A <sub>t</sub> Simulada	A <sub>t</sub> Real	Variación porcentual relativa	Longitud, m		Variación porcentual relativa
					L simulada	L real	
psig	°C	m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	%			%
20 ± 0,5	122,07	0,26	0,19	26,92	0,277	0,235	15,16
30 ± 0,5	131,33	0,23	0,19	17,39	0,259	0,235	9,27
40 ± 0,5	138,89	0,21	0,19	9,52	0,251	0,235	6,37
50 ± 0,5	145,33	0,21	0,19	9,52	0,249	0,235	5,62
60 ± 0,5	150,95	0,20	0,19	5,00	0,244	0,235	3,69

**Tabla 9.** Diámetros y Longitudes del secador:  $V_{rc}=6$  rpm;  $P_v=60$  psig; Variable= $b$   
Parámetro de entrada: Flujo másico de producción

<b>b</b>	<b>A<sub>t</sub> Simulada</b>	<b>A<sub>t</sub> Real</b>	<b>Variación porcentual relativa</b>	<b>Diámetro, m</b>		<b>Variación porcentual relativa</b>
				<b>D simulado</b>	<b>D real</b>	
<b>mm</b>	<b>m<sup>2</sup></b>	<b>m<sup>2</sup></b>	<b>%</b>	<b>D simulado</b>	<b>D real</b>	<b>%</b>
0,20	0,20	0,19	5,00	0,132	0,127	3,79
0,30	0,21	0,19	9,52	0,134	0,127	5,22
0,40	0,19	0,19	0,00	0,127	0,127	0,00
0,50	0,18	0,19	5,56	0,124	0,127	2,42
<b>b</b>	<b>A<sub>t</sub> Simulada</b>	<b>A<sub>t</sub> Real</b>	<b>Variación porcentual relativa</b>	<b>Longitud, m</b>		<b>Variación porcentual relativa</b>
				<b>L simulada</b>	<b>L real</b>	
<b>mm</b>	<b>m<sup>2</sup></b>	<b>m<sup>2</sup></b>	<b>%</b>	<b>L simulada</b>	<b>L real</b>	<b>%</b>
0,20	0,20	0,19	5,00	0,244	0,235	3,69
0,30	0,21	0,19	9,52	0,248	0,235	5,24
0,40	0,19	0,19	0,00	0,235	0,235	0,00
0,50	0,18	0,19	5,56	0,229	0,235	2,62

**Tabla 10.** Diámetros y Longitudes del secador:  $b=0,20$  mm;  $P_v=60$  psig; Variable= $V_{rc}$   
Parámetro de entrada: Flujo másico de producción

<b>V<sub>rc</sub></b>	<b>A<sub>t</sub> Simulada</b>	<b>A<sub>t</sub> Real</b>	<b>Variación porcentual relativa</b>	<b>Diámetro, m</b>		<b>Variación porcentual relativa</b>
				<b>D simulado</b>	<b>D real</b>	
<b>rpm</b>	<b>m<sup>2</sup></b>	<b>m<sup>2</sup></b>	<b>%</b>	<b>D simulado</b>	<b>D real</b>	<b>%</b>
5 ± 0,5	0,18	0,19	5,56	0,126	0,127	0,79
6 ± 0,5	0,20	0,19	5,00	0,132	0,127	3,79
7 ± 0,5	0,21	0,19	9,52	0,136	0,127	6,62
<b>V<sub>rc</sub></b>	<b>A<sub>t</sub> Simulada</b>	<b>A<sub>t</sub> Real</b>	<b>Variación porcentual relativa</b>	<b>Longitud, m</b>		<b>Variación porcentual relativa</b>
				<b>L simulada</b>	<b>L real</b>	
<b>rpm</b>	<b>m<sup>2</sup></b>	<b>m<sup>2</sup></b>	<b>%</b>	<b>L simulada</b>	<b>L real</b>	<b>%</b>
5 ± 0,5	0,18	0,19	5,56	0,232	0,235	1,29
6 ± 0,5	0,20	0,19	5,00	0,244	0,235	3,69
7 ± 0,5	0,21	0,19	9,52	0,252	0,235	6,75

Los diámetros y las longitudes simuladas cuando el parámetro de entrada es el flujo másico del agua evaporada SETA II, se pueden apreciar en las siguientes tablas.

**Tabla 11.** Diámetros y Longitudes del secador;  $V_{rc}=6$  rpm;  $b=0,20$  mm; Variable= $P_v$   
Parámetro de entrada: Flujo másico del agua evaporada

$P_v$	$T_v$	$A_t$ Simulada	$A_t$ Real	Variación porcentual relativa	Diámetro, m		Variación porcentual relativa
					D simulado	D real	
psig	°C	$m^2$	$m^2$	%			%
$20 \pm 0,5$	122,07	0,25	0,19	24,00	0,148	0,127	14,19
$30 \pm 0,5$	131,33	0,25	0,19	24,00	0,146	0,127	13,01
$40 \pm 0,5$	138,89	0,23	0,19	17,39	0,141	0,127	9,93
$50 \pm 0,5$	145,33	0,22	0,19	13,64	0,137	0,127	7,30
$60 \pm 0,5$	150,95	0,21	0,19	9,52	0,135	0,127	5,93
$P_v$	$T_v$	$A_t$ Simulada	$A_t$ Real	Variación porcentual relativa	Longitud, m		Variación porcentual relativa
					L simulada	L real	
psig	°C	$m^2$	$m^2$	%			%
$20 \pm 0,5$	122,07	0,25	0,19	24,00	0,273	0,235	13,92
$30 \pm 0,5$	131,33	0,25	0,19	24,00	0,270	0,235	12,96
$40 \pm 0,5$	138,89	0,23	0,19	17,39	0,260	0,235	9,62
$50 \pm 0,5$	145,33	0,22	0,19	13,64	0,254	0,235	7,48
$60 \pm 0,5$	150,95	0,21	0,19	9,52	0,249	0,235	5,62

**Tabla 12.** Diámetros y Longitudes del secador;  $V_{rc}=6$  rpm;  $P_v=60$  psig; Variable= $b$   
Parámetro de entrada: Flujo másico del agua evaporada

$b$	$A_t$ Simulada	$A_t$ Real	Variación porcentual relativa	Diámetro, m		Variación porcentual relativa
				D simulado	D real	
mm	$m^2$	$m^2$	%			%
0,20	0,21	0,19	9,52	0,135	0,127	5,93
0,30	0,20	0,19	5,00	0,132	0,127	3,79
0,40	0,18	0,19	5,56	0,125	0,127	1,60
0,50	0,17	0,19	11,76	0,120	0,127	5,83
$b$	$A_t$ Simulada	$A_t$ Real	Variación porcentual relativa	Longitud, m		Variación porcentual relativa
				L simulada	L real	
mm	$m^2$	$m^2$	%			%
0,20	0,21	0,19	9,52	0,249	0,235	5,62
0,30	0,20	0,19	5,00	0,245	0,235	4,08
0,40	0,18	0,19	5,56	0,231	0,235	1,73
0,50	0,17	0,19	11,76	0,222	0,235	5,86

**Tabla 13.** Diámetros y Longitudes del secador;  $b=0,20$  mm;  $P_v=60$  psig; Variable= $V_{rc}$   
Parámetro de entrada: Flujo másico del agua evaporada

$V_{rc}$	$A_t$ Simulada	$A_t$ Real	Variación porcentual relativa	Diámetro, m		Variación porcentual relativa
rpm	$m^2$	$m^2$	%	D simulado	D real	%
$5 \pm 0,5$	0,20	0,19	5,00	0,132	0,127	3,79
$6 \pm 0,5$	0,21	0,19	9,52	0,135	0,127	5,93
$7 \pm 0,5$	0,22	0,19	13,64	0,137	0,127	7,30
$V_{rc}$	$A_t$ Simulada	$A_t$ Real	Variación porcentual relativa	Longitud, m		Variación porcentual relativa
rpm	$m^2$	$m^2$	%	L simulada	L real	%
$5 \pm 0,5$	0,20	0,19	5,00	0,245	0,235	4,08
$6 \pm 0,5$	0,21	0,19	9,52	0,249	0,235	5,62
$7 \pm 0,5$	0,22	0,19	13,64	0,254	0,235	7,48

Se ejecutó el programa SETA II que utiliza el flujo másico del agua evaporada como parámetro de entrada; con datos de presión de vapor y flujo de agua evaporada obtenidos de empresas que fabrican comercialmente secadores de doble tambor en los Estados Unidos.

Se conservaron los siguientes parámetros de entrada:  $P_a=10,6$  psig;  $h=21,75$  kJ/m<sup>2</sup>h°C;  $h_w=24\ 682,25$  kJ/m<sup>2</sup>h°C;  $T_a=291^\circ\text{K}$ ;  $T_c=647,13$ ;  $v=0,015$  m/s;  $h_m=15\ 867,77$  kJ/m<sup>2</sup>h°C;  $h_p=381,29$  kJ/m<sup>2</sup>h°C;  $X_i=2,96$  kg H<sub>2</sub>O/kg sólido seco;  $X=0,16$  kg H<sub>2</sub>O/kg sólido seco; y Distancia angular=208°.

Las variaciones porcentuales relativas de las áreas simuladas respecto de las comerciales son pequeñas como se observa en las tablas 14 y 15.

**Tabla 14.** Áreas de los tambores a una Pv=100 psig

Presión	Área de los tambores		Variación porcentual relativa
	A <sub>t</sub> Simulada	A <sub>t</sub> Comercial	
100 psig			
kg H <sub>2</sub> O evaporada/h	m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	%
10,00	0,19	0,20	5,26
45,50	0,86	0,87	1,16
121,40	2,29	2,32	1,31
243,20	4,58	4,65	1,53
350,90	6,61	6,78	2,57
485,90	9,16	9,38	2,40
607,30	11,45	11,71	2,27
675,00	12,72	13,01	2,28
797,30	15,03	15,33	2,00
885,90	16,70	17,00	1,80
1063,20	20,04	20,44	2,00
1822,30	34,35	35,02	1,95

**Tabla 15.** Áreas de los tambores a una Pv=160 psig

Presión	Área de los tambores		Variación porcentual relativa
	A <sub>t</sub> Simulada	A <sub>t</sub> Comercial	
160 psig			
kg H <sub>2</sub> O evaporada/h	m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	%
12,70	0,18	0,20	11,11
57,30	0,80	0,87	8,75
152,30	2,13	2,32	8,92
304,50	4,26	4,65	9,15
440,00	6,15	6,78	10,24
609,50	8,52	9,38	10,09
761,80	10,65	11,71	9,95
846,40	11,83	13,01	9,97
999,50	13,97	15,33	9,74
1110,90	15,52	17,00	9,54
1333,20	18,63	20,44	9,72
2285,00	31,93	35,02	9,68

En las tablas 16 y 17 se puede observar las longitudes y los diámetros estimados por SETA II. Las relaciones longitud/diámetro se las puede observar en el numeral 3.1.10 del Anexo III.

**Tabla 16.** Dimensiones de los tambores a una  $P_v=100$  psig

Presión	Diámetro		Variación porcentual relativa	Longitud		Variación porcentual relativa
	D Simulado	D Comercial		L Simulada	L Comercial	
100 psig						
kg H <sub>2</sub> O evaporada/h	m	m	%	m	m	%
10,00	0,150	0,152	1,33	0,200	0,203	1,50
45,50	0,302	0,305	0,99	0,452	0,457	1,11
121,40	0,603	0,610	1,16	0,603	0,610	1,16
243,20	0,604	0,610	0,99	1,208	1,219	0,91
350,90	0,806	0,813	0,87	1,306	1,321	1,15
485,90	0,805	0,813	0,99	0,811	1,829	0,99
607,30	0,805	0,813	0,99	2,263	2,286	1,02
675,00	0,804	1,813	1,12	2,517	2,540	0,91
797,30	1,057	1,067	0,95	2,262	2,286	1,06
885,90	1,052	1,067	1,43	2,525	2,540	0,59
1063,20	1,056	1,067	1,04	3,020	3,048	0,93
1822,30	1,509	1,524	0,99	3,622	3,658	0,99

**Tabla 17.** Dimensiones de los tambores a una  $P_v=160$  psig

Presión	Diámetro		Variación porcentual relativa	Longitud		Variación porcentual relativa
	D Simulado	D Comercial		L Simulada	L Comercial	
160 psig						
kg H <sub>2</sub> O evaporada/h	m	m	%	m	m	%
12,70	0,145	0,152	4,83	0,195	0,203	4,10
57,30	0,291	0,305	4,81	0,437	0,457	4,58
152,30	0,582	0,610	4,81	0,582	0,610	4,81
304,50	0,582	0,610	4,81	1,164	1,219	4,73
440,00	0,775	0,813	4,90	1,263	1,321	4,59
609,50	0,776	0,813	4,77	1,746	1,829	4,75
761,80	0,772	0,813	5,31	2,182	2,286	4,77
846,40	0,776	0,813	4,77	2,427	2,540	4,66

**Tabla 17.** Dimensiones de los tambores a una  $P_v=160$  psig, **Continuación**

Presión	Diámetro		Variación porcentual relativa	Longitud		Variación porcentual relativa
	D Simulado	D Comercial		L Simulada	L Comercial	
160 psig						
kg H <sub>2</sub> O evaporada/h	m	m	%	m	m	%
999,50	1,019	1,067	4,71	2,181	2,286	4,81
1110,90	1,015	1,067	5,12	2,435	2,540	4,31
1333,20	1,018	1,067	4,81	2,912	3,048	4,67
2285,00	1,455	1,524	4,83	3,492	3,658	4,10

Estos resultados permitieron concluir que el programa de dimensionamiento SETA II, se adaptó de manera adecuada a secadores comerciales, como lo demuestran los resultados de las tablas 14, 15, 16 y 17.

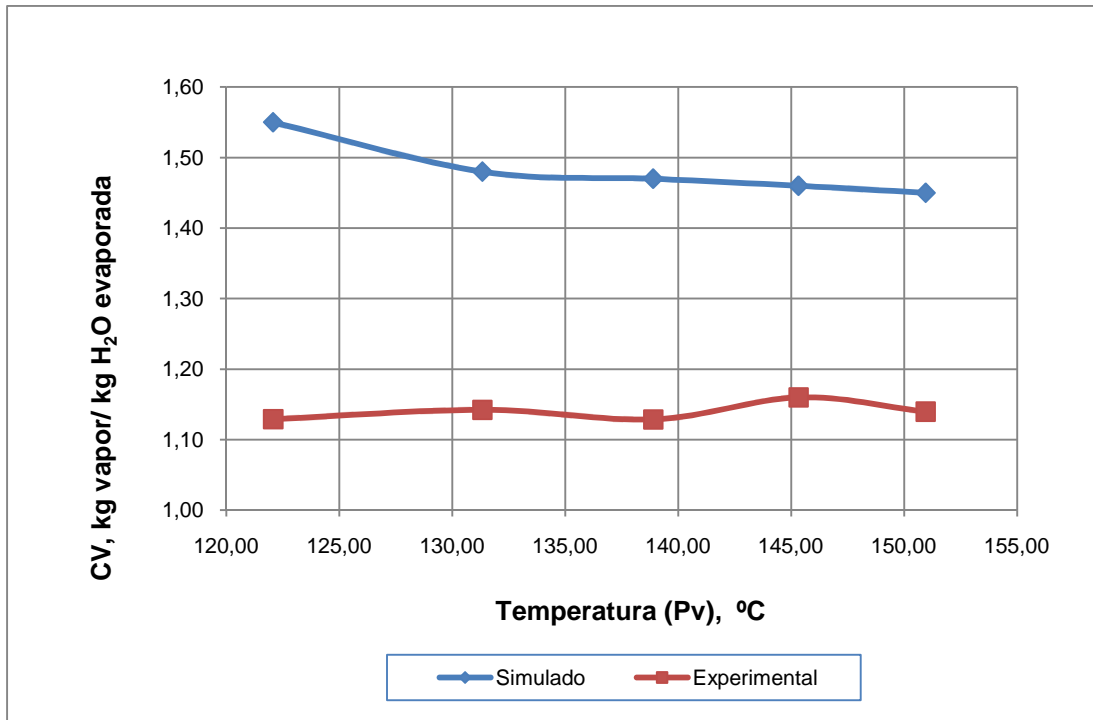
Por otra parte, los programas permitieron hallar: (1) El consumo de vapor; y (2) La velocidad de producción.

### 3.3.7 CONSUMO DE VAPOR ESPECÍFICO

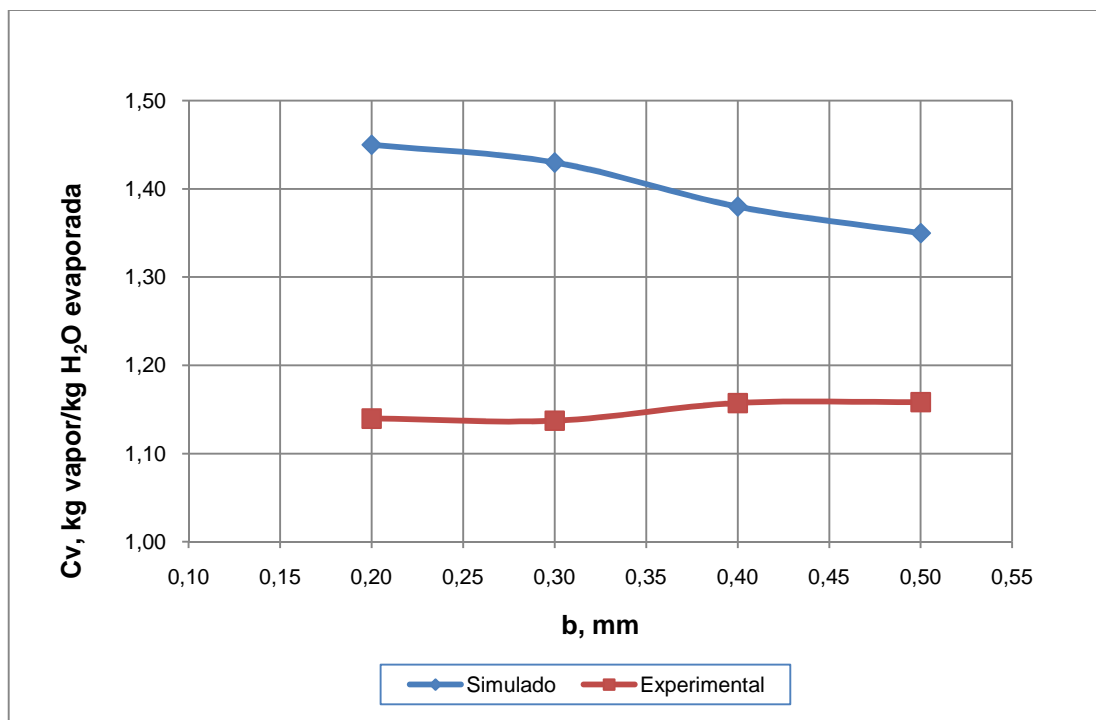
Los consumos de vapor determinados por los programas son iguales para todas las condiciones de operación. Consecuentemente se presenta en las figuras el valor simulado y el experimental; estos consumos se pueden revisar en el numeral 3.1.7 del Anexo III. Las variaciones porcentuales relativas de los consumos de vapor específicos obtenidos por los programas respecto a los valores experimentales corresponden a que los programas proveen un flujo de vapor 1,3 veces más grande respecto al flujo experimental.

En las figuras 42, 43 y 44, se pueden ver las curvas del consumo de vapor específico.

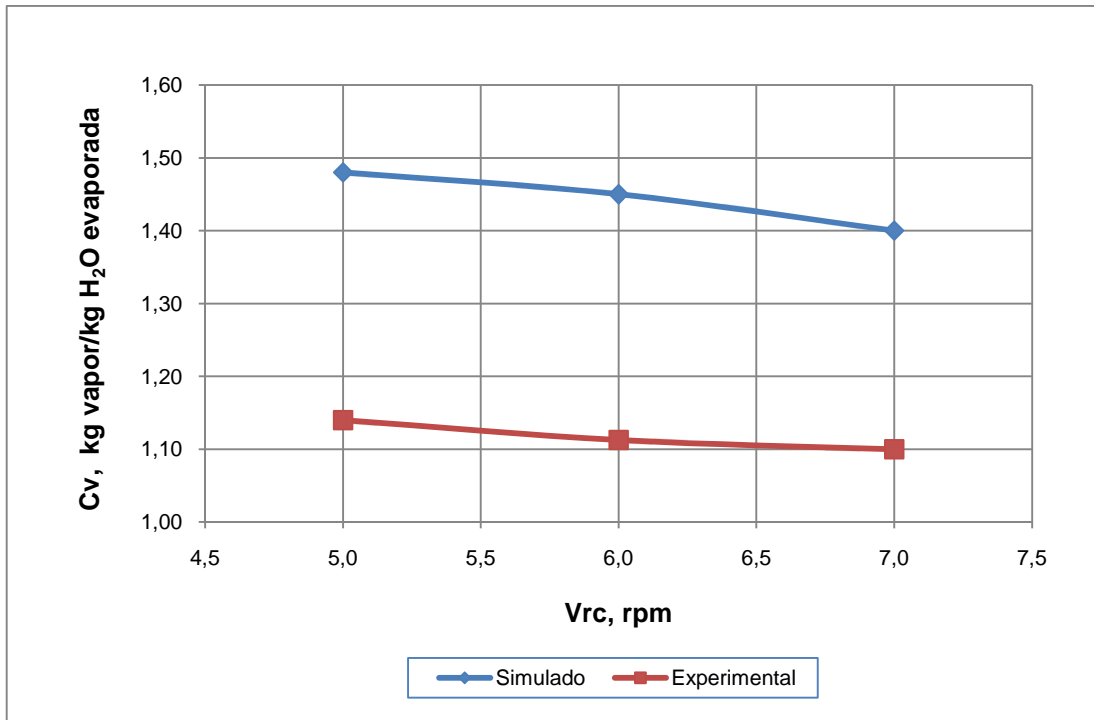




**Figura 41.** Consumo de vapor específico en función de la temperatura del vapor  
Vrc=6 rpm; b=0,20 mm



**Figura 42.** Consumo de vapor específico en función de la separación entre tambores  
Vrc=6 rpm; Pv=60 psig



**Figura 43.** Consumo de vapor específico en función de la velocidad de rotación  
 $P_v = 60$  psig;  $b = 0,20$  mm

### 3.3.8 VELOCIDAD DE PRODUCCIÓN

Como se esperaba la velocidad de producción tiene un comportamiento cualitativo similar al flujo másico de producción; no obstante, la velocidad de producción depende, además del flujo másico de producción, del área de secado. Se puede encontrar las velocidades de producción en el numeral 3.1.8 del Anexo III.

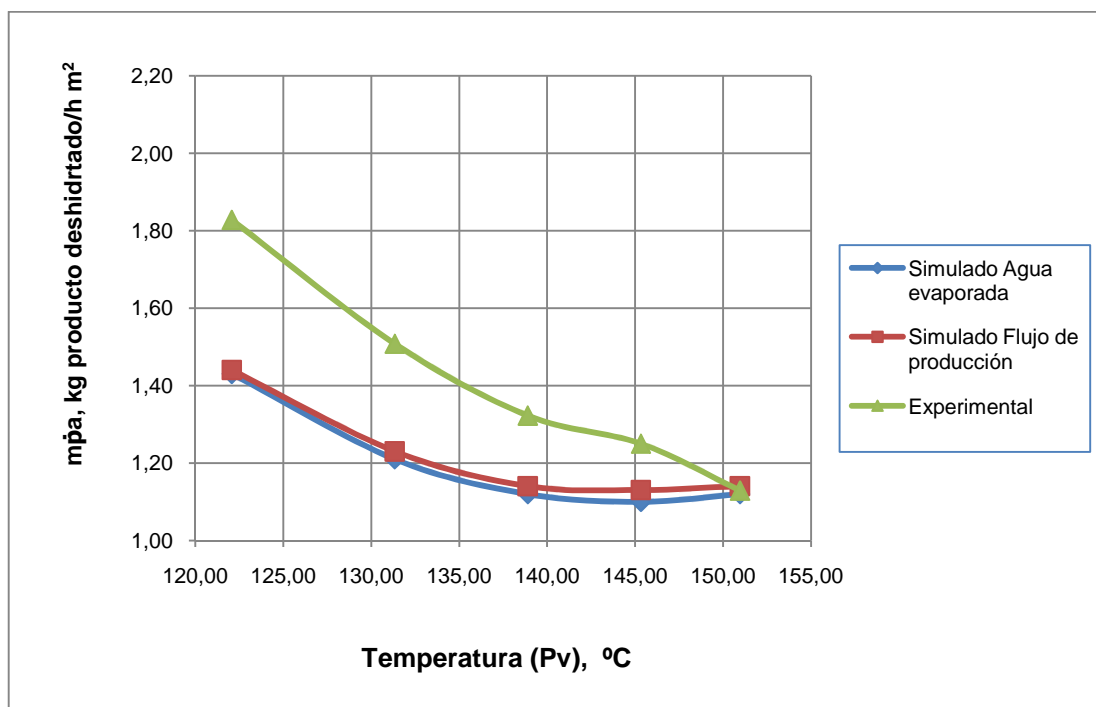
La nomenclatura respecto a: Simulado Agua evaporada, se refiere a la productividad determinada cuando el flujo de agua evaporada es el parámetro de entrada; y, al contrario, Simulado Flujo de producción, se refiere a que es el flujo másico de producción el parámetro de entrada; en cada uno de los programas respectivamente.

### Disminución de la velocidad de producción con el aumento de la temperatura de la superficie de secado

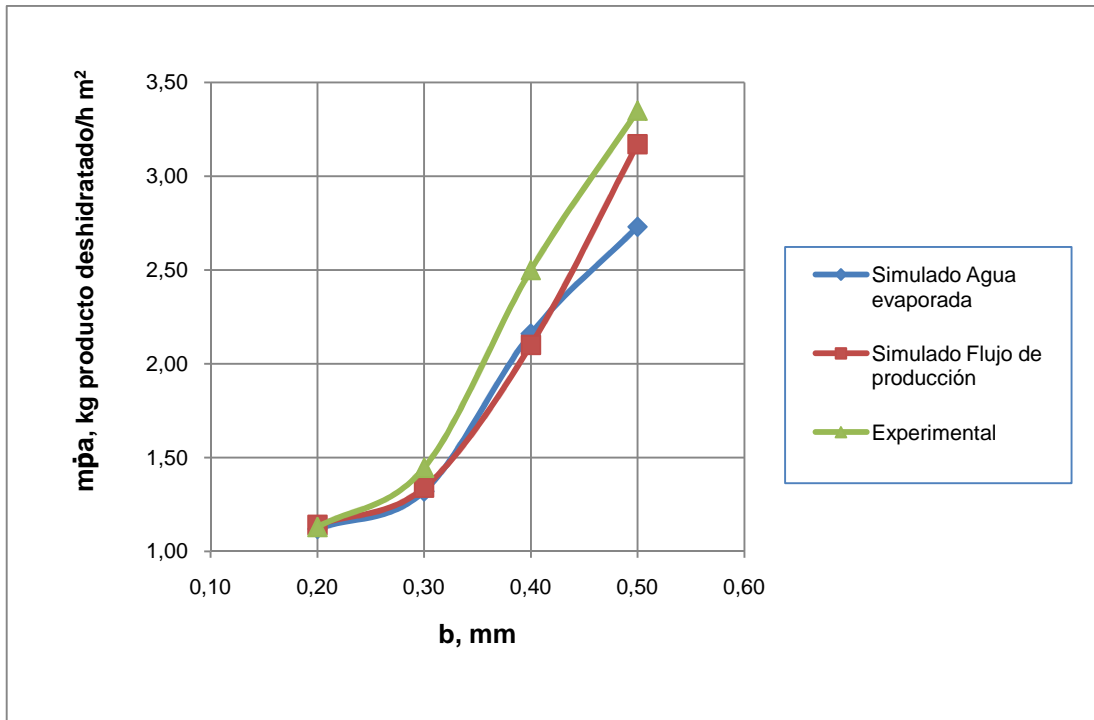
En la figura 44 se puede ver el incremento de la velocidad de producción conforme aumenta la temperatura del vapor, y se debe al aumento del flujo másico de producción; por lo que la curva de la velocidad de producción tiene el mismo comportamiento cualitativo que la curva del flujo másico de producción.

### Aumento de la velocidad de producción con el aumento de la separación entre tambores

En la figura 45 se puede ver que la velocidad de producción aumenta con la separación, debido al incremento del flujo másico de producción, y de igual manera la curva de la velocidad de producción presenta el mismo comportamiento que la curva del flujo másico de producción.



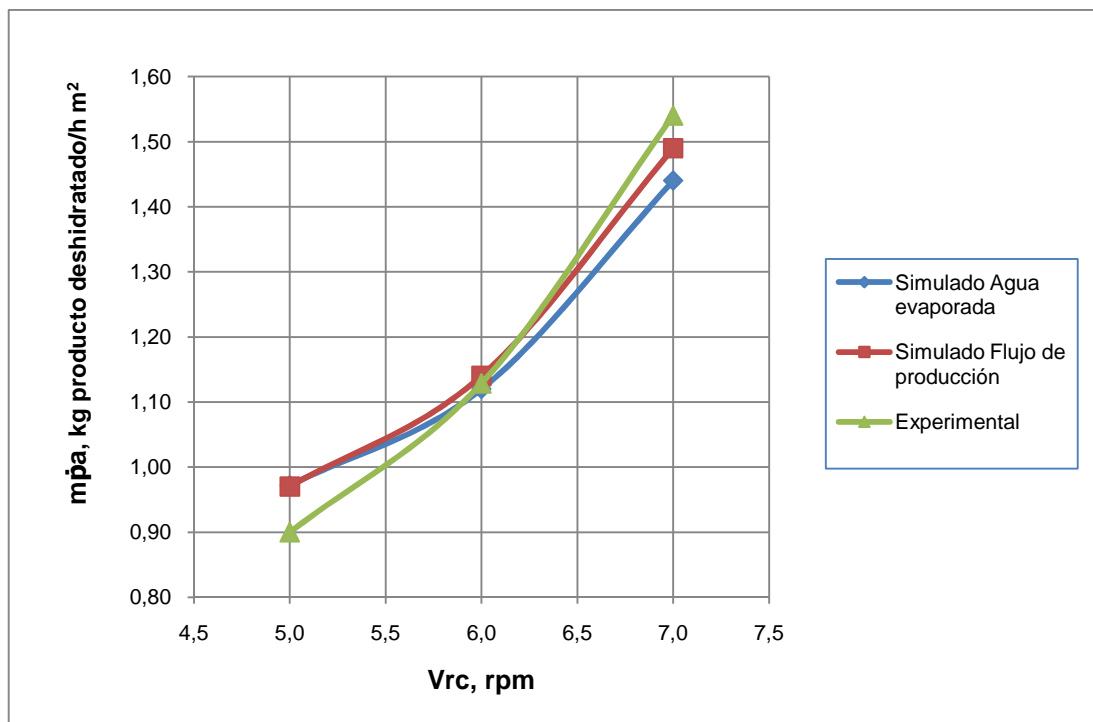
**Figura 44.** Productividad en función de la temperatura del vapor:  $V_{rc}=6$  rpm;  $b=0,20$  mm



**Figura 45.** Productividad en función de la separación entre tambores  
 $V_{rc}=6$  rpm;  $P_v=60$  psig

### **Aumento de la velocidad de producción con el aumento de la velocidad de rotación de los tambores**

La figura 46 se puede observar un aumento de la velocidad de producción con el aumento de las velocidades de rotación, debido al incremento del flujo másico de producción, y como se esperaba la curva de la velocidad de evaporación muestra un comportamiento cualitativo similar que la curva del agua evaporada.



**Figura 46.** Productividad en función de la velocidad de rotación  
 $P_v = 60$  psig;  $b = 0,20$  mm

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1 CONCLUSIONES

- Los programas SETA I y SETA II, proporcionan una directriz general para dimensionar secadores de doble tambor de tamaño determinados.
- Los resultados presentados en el capítulo 3, en las tablas 16, 17, 18 y 19, permitieron concluir que las dimensiones obtenidas por el programa de dimensionamiento SETA II tienen aproximaciones razonables a las dimensiones industriales.
- Los dos algoritmos desarrollados para el diseño de SETA I y SETA II se enlazaron de manera adecuada, puesto que las variaciones porcentuales relativas de las dimensiones estimadas por los programas respecto a las dimensiones del secador utilizado en los experimentos son pequeñas, como se observa en las tablas 8, 9, 10, 11, 12 y 13.
- Las variables presión del vapor, separación entre tambores y velocidad de rotación afectaron el contenido de humedad final de la película deshidratada, el flujo másico de evaporación del agua, y subsecuentemente la velocidad de secado.
- El banano utilizado en la obtención de la pasta tuvo un contenido de solubles de  $19,33 \pm 0,60$ ; una humedad inicial de  $2,96 \text{ kg H}_2\text{O/kg sólido seco}$ ; y un grado de madurez del rango 4-5, pues al deshidratar la pasta se obtuvo un desprendimiento adecuado de las películas formadas, que tuvieron, además, buenas características.

## 4.2 RECOMENDACIONES

- Se recomienda que se adquiriera, o se construya, un dispositivo que permita la medición de la conductividad térmica de los materiales alimenticios para un rango de temperaturas entre 91 °C y 150 °C; puesto que, en el presente Proyecto de Titulación, no se pudo efectuar la medición de la conductividad térmica de la película de banano; no obstante, el coeficiente de transferencia de calor ( $h_p$ ) se estimó indirectamente como se muestra en el numeral 4.1.3 del Anexo II.
- Además, se recomienda efectuar un estudio de las variables de operación sobre la humedad final, flujo másico del agua evaporada y la velocidad de evaporación del agua bajo condiciones de convección forzada.

## 5. BIBLIOGRAFÍA

Brennan, J., Butters, J., Cowell, N., y Lilley, A., 1998, "Las operaciones de la ingeniería de los alimentos", 3ra. edición, Editorial Acirbia, Zaragoza, España, p. 382.

Buflovak, 2004, "Atmosferheric Double Drum Dryers"  
<http://www.buflovak.com/pdf/ADDD%20-%20dimensions.pdf>, (Agosto, 2009).

Daud, W., y Talib, M., 2000, "Drum Dryer Model", 12th International Drying Symposium, Paper 196.

Díaz, J., 1982, "Producción de una mezcla alimenticia de banano y soya deshidratada en secador de rodillos", Tesis previa a la obtención de título de Ingeniero en la Especialización de Ingeniero Químico, EPN, Quito, Ecuador, p. 22.

Drum Drying Resources, 2009; "Secadoras de Tambor Dobles de Tipo Atmosférico, Principios de Operación y de producción de Alimentos",  
[www.quiminet.com/archivos\\_empresa/01a6d5d98c4d06b4486563e359.pdf](http://www.quiminet.com/archivos_empresa/01a6d5d98c4d06b4486563e359.pdf),  
(Agosto, 2009).

Gavrielidou, M.; Vallous, N.; Karapantsios, T. y Raphaelides, S., 2002, "Heat transport to a starch slurry gelatinizing between the drums of a double drum dryer", Journal of Food Engineering, 54 (1), 45.

Genereaux, R., O'neil, P., Webb, W., y Nolan, R., 1973, "Transport and Storage of Fluids" en Perry, R., "Chemical Engineers Handbook", 5th. edition, McGraw-Hill, Tokyo, Japan, p. 17.

Gong, Z., y Mujumdar, A., 2008, "Software for Design and Analysis of Drying Systems", Drying Technology, 26 (7), 884.



Guerra, G., 2008 "Diseño de Procesos para Pequeñas y Medianas Empresas", p. 95, en prensa.

Helland, E. y Muri, T., 2007, "Drying Technologies for Chemical and Mineral Processing Applications", en León, B., "Chemical Engineering Research Trends", Nova Science Publishers, New York, The United States of America, p. 208.

Himmelblau, D., 2002, "Principios Básicos y Cálculos en Ingeniería Química", 6ta. edición, Pearson Educación, Naucalpan de Juárez, México, p. 669.

Holman, J., 1998, "Transferencia de Calor", 8va. edición, McGraw-Hill/Interamericana, Madrid, España, p. 236.

Islam, M.; Thaker, S. y Mujumdar, A., 2007, "A Diffusion Model for a Drum Dryer Subjected to Conduction, Convection, and Radiant Heat Input", Drying Technology, 25 (6), 1043.

Jayaraman y Gupta, D., 1995 "" en Mujumdar, "Handbook of Industrial Drying", 2nd edition, Marcel Dekker, New York, The United States of America, p. 662.

Kalogianni, E.; Xynogalos, V.; Karapantsios, T y Kostoglou, M., 2002, "Effect of Feed Concentration on the Production of Pregelatinized Starch in a Double Drum Dryer", Lebensmittel-Wissenschaftund-Technology, 35 (8), 703.

Kasiri, N., Hasanzadeh, M., y Mhoghdam, M., 2004, "Mathematical Modeling and Computer Simulation of a Drum Dryer", Iranian Journal of Science & Technology, 28 (B6), 679.

Kostoglou, M., y Karapantsios, T., 2003, "On the thermal inertia of the wall of a drum dryer under a cyclic steady state operation", Journal of Food Engineering, 60(4), p. 453.

Lecompte, D. y Fudym, O., 2004, "Method for the Design of a contact Dryer-Application to Sludge Treatment in Thin Film Boiling", *Drying Technology*, 22 (9) p. 2151.

Lienhard IV y Lienhard V, 1987, "A Heat Transfer Textbook", 3rd edition, Phlogiston Press, Massachusetts, The United States of America, p. 657.

Mills, A., 1995, "Transferencia de Calor", 1ra. edición, McGraw-Hill/Irwin, Madrid, España, p. 874.

Moore, J., 1995, "Drum Dryers", en Mujumdar, "Handbook of Industrial Drying", 2nd edition, Marcel Dekker, New York, The United States of America, pp. 249, 252.

Mujumdar, A. y Menon, A., 1995, "Handbook of Industrial Drying", 2nd edition, Marcel Dekker, New York, The United States of America, p. 26.

Nonhebel, G. y Moss, M., 1979, "El secado de sólidos en la industria química", Editorial Reverté, Barcelona, España, pp. 2, 37, 38, 39, 187, 190, 203.

Oakley, D., 1997, "Contact Dryers", en Baker, C., "Industrial Drying of Foods", 1st edition, Blackie Academic & Professional, London, UK, pp. 115, 116, 131.

Okos, M., Narsimhan, G., Singh, R. y Weitnauer, A., 1992, "Food Dehydration" en Heldman, D., "Handbook of Food Engineering", 1st edition, Marcel Dekker, New York, The United States of America, pp. 508, 510, 511.

Ramli, W. y Daud, W., 2006, "Drum Dryers" en Mujumdar, A., "Hanbook of Industrial Drying", 3rd edition, CRC Press Taylor & Francis Group, New York, The United States of America, pp. 205, 208, 209.

Rodriguez, G.; Vasseur, J. y Courtois, F., 1996, "Design and Control of drum Dryers for the Food Industry. Part 1. Set-Up of a Moisture sensor and an Inductive Heater", *Journal of Food Engineering*, 28 (3), 279.

Spiegel, M., 1991, "Estadística", 2da. edición, McGraw-Hill, Naucalpan de Juárez, México, p. 537.

Supprung, P. y Noomhorm, A., 2003, "Optimization of Drum Drying Parameters for Low Amylose Rice (KDML105) Starch and Flour", *Drying Technology*, 21 (9), 1782.

Tang, J., Feng, H., y Shen G., 2003, "Drum Drying" en Heldman, D., "Encyclopedia of Agricultural, Food and Biological Engineering ", Marcel Dekker, New York, The United States of America, p. 211.

Traub, D., 2006, "Indirect Dryers Overview", *Process Heating*, 13 (6), 33.

Treybal, R., 1988, "Operaciones de Transferencia de Masa", 2da. edición, McGraw-Hill Book Co., New York, Estados Unidos de América, p. 768.

Vanaclocha, A. y Requena, J., 2003, "Procesos de conservación de alimentos", 2da. edición, Editorial Aedos, Madrid, España, p. 378.

Vasseur, J.; Abchir, F. y Trystram, G., 1991 "Modelling of Drum-Drying", en Mujumdar, A. y Filkova I., *Drying 91*, Elsevier Applied Science Publishers, Amsterdam, Netherlands, pp. 121-129.

## ANEXO I

## ESCALA DE MADUREZ DEL BANANO

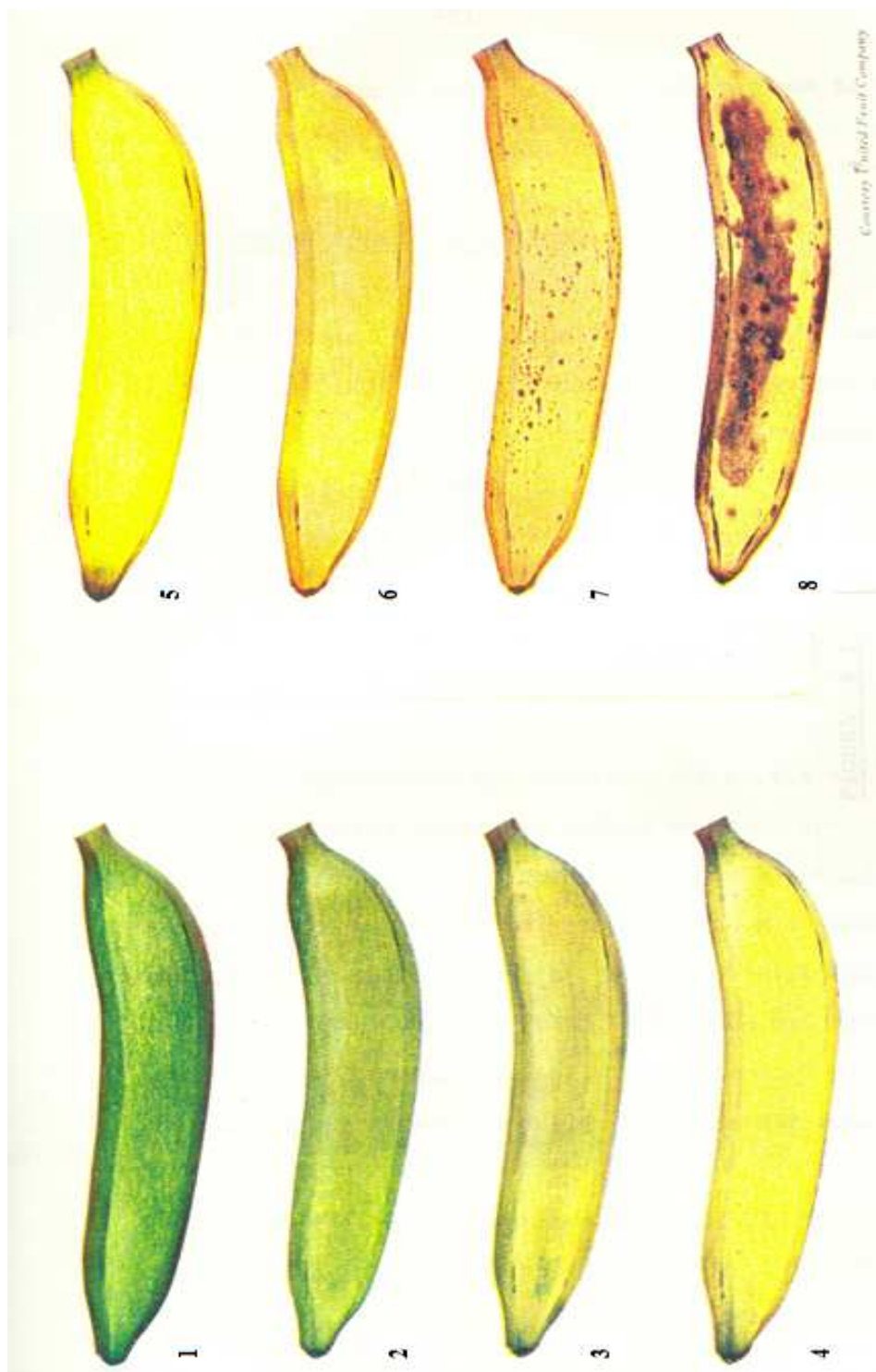


Figura 47. Grado de madurez según Von Loesecke

## ANEXO II

### EJEMPLO DE CÁLCULO

#### 1. Humedad

##### 1.1 Determinación de la Humedad Inicial

La humedad inicial expresada en base seca es igual a:

$$X_i = \frac{m_2 - m_4}{m_3 - m_1}$$

$$X_i = \frac{5,00g - 1,26g}{16,06g - 14,80g}$$

$$X_i = 2,96 \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg Sólido Seco}}$$

##### 1.2 Determinación de la Humedad Final

La humedad final expresada en base seca, para una  $V_{rc}=5$  rpm,  $P_v=60$  psig y  $d=0,20$  mm es igual a:

$$X_f = \frac{m_2 - m_4}{m_3 - m_1}$$

$$X_f = \frac{4,02g - 3,61g}{18,43g - 14,82g}$$

$$X_f = 0,11 \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg Sólido Seco}}$$

## 2. Balance de Masa y Energía

### 2.1.1 Balance de Masa

El flujo másico del agua evaporada se determinó empleando la ecuación que se plantea a continuación, cuando las condiciones de operación fueron  $V_{rc}=5$  rpm,  $P_v=60$  psig y  $b=0,20$  mm y la cantidad de pasta alimentada= $0,850$  kg:

$$m_{H_2Oin} = m_{H_2O} + m_{H_2Of}$$

$$m_{H_2O} = \frac{\text{Peso de pasta alimentada} * X_i}{(1 + X_i) * t_s} - \frac{\text{Peso de la película deshidratada} * X_f}{(1 + X_f) * t_s}$$

$$m_{H_2O} = \frac{0,850 \text{ kg} * 2,96 * 60 \text{ min}}{(1 + 2,96) * 5,17 \text{ min} * 1 \text{ h}} - \frac{0,217 \text{ kg} * 0,12 * 60 \text{ min}}{(1 + 0,12) * 5,17 \text{ min} * 1 \text{ h}}$$

$$m_{H_2O} = 7,10 \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{h}}$$

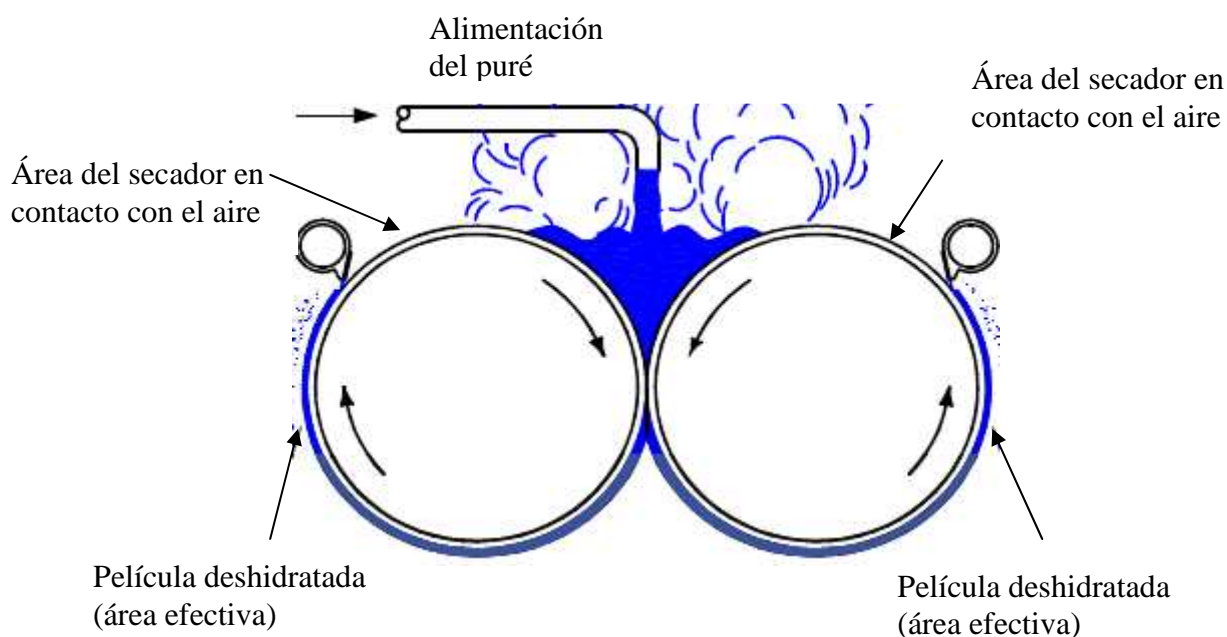
### 2.1.2 Balance de Energía

El balance de energía se establece considerando que el calor entregado por el vapor es igual a la suma del calor transferido para la evaporación del agua de la película del banano, y del calor disipado por convección libre.

La convección libre considera la sumatoria de la pérdida por la película deshidratada y la pérdida por el área del secador en contacto con el aire.

La pérdida por la película considera el área del tambor  $A_c$  en contacto con ésta, donde la temperatura de la superficie de secado es la obtenida en la simulación, cabe aclarar que la primera parte del desarrollo de los programas SETA I y SETA II abarca el primer algoritmo formulado, por tanto permiten obtener la misma temperatura de la superficie de secado.

La pérdida por el área libre que se encuentra en contacto con el aire toma la temperatura del vapor como la temperatura de la pared del secador si se desprecia la resistencia de la película del condensado dentro del cilindro y la resistencia de la pared del tambor. En la siguiente figura se puede apreciar un esquema del secador que describen las áreas tomadas.



**Figura 48.** Área efectiva y área libre del secador de doble tambor

El flujo másico de la cantidad de agua evaporada se calculó de acuerdo a la siguiente ecuación.

$$\lambda_v \dot{m}_v = \lambda \dot{m}_{H_2O} + h A_c (T_{ss} - T_a) + h_1 A_1 (T_v - T_a)$$

$P_v=60$  psig, cuya  $\lambda_v = 2119,86$  kJ/kg;  $V_{rc}=5$  rpm, y  $b=0,20$  mm, y a la  $T_{ss}=125,40$  °C, donde  $\lambda=2289,44$  kJ/kg. Con un  $A_c=0,1086$  m<sup>2</sup> y  $A_1=0,080$  m<sup>2</sup>. Las propiedades se tomaron de Mills, 1995

El flujo másico del vapor se calculó considerando que la cantidad del condensado recogido fue igual a la cantidad de vapor empleado en la deshidratación, de la siguiente manera:

$$\dot{m}_v = \dot{m}_c$$

$$\dot{m}_v = \frac{0,700 \text{ kg}}{5,17 \text{ min}} * \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}}$$

$$\dot{m}_v = 8,10 \frac{\text{kg vapor}}{\text{h}}$$

Del balance energético:

$$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{\lambda_v \dot{m}_v - hA_c(T_{\text{ss}} - T_a) + h_l A_l (T_v - T_a)}{\lambda}$$

$$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{2119,86 * 8,10 * -21,57 * 0,1086(125,41 - 18) - 22,33 * 0,08(150,95 - 18)}{2289,44}$$

$$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} = 8,25 \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{h}}$$

### 3. Velocidad de evaporación del agua

Al ser un proceso semi-batch, el área de secado se obtuvo multiplicando la velocidad de rotación de los tambores por el tiempo de secado y por el área efectiva de los tambores.

$$A_h = \frac{5 \text{ rev}}{\text{min}} * \frac{0,1086 \text{ m}^2}{1 \text{ rev}} * 5,17 \text{ min}$$

$$A_h = 2,81 \text{ m}^2$$

La velocidad de evaporación del agua:

$$N = \frac{\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}}}{A_h}$$

$$N = \frac{7,10 \text{ kg H}_2\text{O}}{2,81 \text{ h m}^2}$$



$$N = 2,45 \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{h m}^2}$$

#### 4. Cálculo de los Coeficientes de Transferencia de Calor

##### 4.1.1 Coeficiente de Transferencia de Calor por Condensación

La correlación para la obtención del coeficiente de transferencia de calor por condensación (Ramli y Daud, 2006) es:

$$h_w = 0,555 \left[ \frac{\rho_c(\rho_c - \rho_v)k_c^3 \lambda g}{D_1 \mu_c (T_{\text{sat}} - T_i)} \right]^{1/4}$$

El ejemplo mostrado es cuando la  $P_v=60$  psig, cuya  $T_{\text{sat}}=150,95$  °C, con una  $V_{rc}=6$  rpm y un  $b=0,20$  mm. Se consideró que la diferencia de temperatura entre la  $T_i$  y la  $T_{\text{sat}}$  era del orden de 10 °C, según lo establecido por Vasseur *et al.*, 1991.

Al utilizar esta ecuación todas las propiedades del condensado (Mills, 1995) se deben evaluar a la temperatura de película y las propiedades del vapor a la temperatura de saturación.

$$T_f = \frac{(T_{\text{sat}} + T_i)}{2}$$

$$T_f = \frac{(150,95 + 140,95)}{2}$$

$$T_f = 145,95 \text{ °C}$$

$$h_w = 0,555 \left[ \frac{919,95(919,95 - 2,615)0,684^3 * 2,12 \times 10^6 * 9,8}{0,121 * 1,95 \times 10^{-4}(150,95 - 140,95)} \right]^{1/4}$$

$$h_w = 6\,891,97 \frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

o,

$$h_w = 24\,811,10 \frac{kJ}{m^2 \text{ h } ^\circ\text{C}}$$

Se calcularon los coeficientes de transferencia de calor debido a la condensación  $h_w$  para todas las condiciones, cuyos valores se promediaron, y posteriormente utilizar el valor promediado en las simulaciones. En el numeral 3.2 del Anexo III se puede observar los  $h_w$  obtenidos.

#### 4.1.2 Coeficiente de Transferencia de Calor de la Pared del Secador

Los tambores deben ser certificados y registrados en el Consejo Nacional de Recipientes a Presión de USA (National Pressure Vessel Board) para operar a 160 PSIG de presión de vapor. El espesor de la pared del secador del tambor, tuvo que ser estimado con la ecuación de diseño de recipientes a presión interna del código A.S.M.E, Sección VIII, División 1 (Perry, 1973).

$$e = \frac{PR_1}{S_1E - 0,6P} + C_m$$

El cálculo se realizó para el Acero inoxidable 316, donde:

**Presión de Diseño = 1,2 \* Presión de Trabajo**

**Presión de Diseño = 1,2 \* (160)**

**P = 192 psi**

Con un  $C_m$  de 0,1 pulg; un  $S_1=13\,300$  lb/pulg<sup>2</sup> (Perry, 1973) y cuya conductividad térmica es 57,6 kJ/m h °C a 200 °C (Lienhard IV y Lienhard V, 1987).

Se asumió un  $R_1=3,15$  in y se calculó el espesor, mediante iteración hasta que el valor de  $R_1$  convergió. El  $R_s=5$  pulg.

$$e = \frac{(192 * 3,15)}{13\,300 * 0,8 - 0,6 * 192} + 0,1$$

$$e = 0,157 \text{ pulg}$$

$$e = 3,98 \text{ mm}$$

$$R_1 = R_s - e$$

$$R_1 = 2,50 - 0,157$$

$$R_1 = 2,42 \text{ pulg}$$

$$R_1 = 6,15 \text{ cm} \quad \therefore \quad D_1 = 12,30 \text{ cm}$$

Finalmente el  $R_1$  convergió en 5,99 cm  $\therefore$   $D_1=11,98$  cm; con un  $e=3,63$  mm.

De la siguiente ecuación (Nonhebel y Moss, 1979).

$$h_m = \frac{k_m}{t_m}$$

$$h_m = \frac{57,6}{3,63 \times 10^{-3}}$$

$$h_m = 15\,867,77 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^2 \text{ h } ^\circ\text{C}}$$

#### 4.1.3 Coeficiente de Transferencia de Calor de la Película de banano

El coeficiente de la película se calculó a partir del coeficiente de transferencia de calor por conducción  $K_c$  (Nonhebel y Moss, 1979), para todas las condiciones de operación.

A continuación se presenta el caso cuando la  $P_v=60$  psig, cuya  $T_v=150,95$  °C;  $V_{rc}=5$  rpm, y  $b=0,20$  mm, a la presión de Quito 547 mmHg, donde la  $T_b=91,2$  °C y cuyo  $\lambda=2289,44$  kJ/kg. Las propiedades se tomaron del Mills, 1995.

$$K_c = aU_m$$

$$N = \frac{1}{A_h} \frac{dX}{dt} = \frac{m_{H_2O}}{A_h} = \frac{K_c(T_v - T_b)}{\lambda}$$

$$K_c = \frac{N\lambda}{(T_v - T_b)}$$

$$K_c = \frac{2,52 * 2289,44}{(150,95 - 91,2)}$$

$$K_c = 96,59 \frac{\text{kJ}}{\text{h m}^2\text{°C}}$$

Entonces para determinar  $U_m$ , se estima a un  $a=0,5$ :

$$U_m = \frac{K_c}{a}$$

$$U_m = \frac{96,59}{0,5}$$

$$U_m = 193,18 \frac{\text{kJ}}{\text{h m}^2\text{°C}}$$

Se despejó  $h_p$  a partir de la siguiente ecuación (Nonhebel y Moss, 1979):

$$\frac{1}{U_m} = \frac{1}{h_f} + \frac{1}{h_p}$$

Donde el valor  $h_f$  se obtuvo del promedio entre el valor típico superior de 1008 kJ/h m<sup>2</sup> °C para una pasta fluida con 50 % de sólidos y el valor típico inferior de 9 kJ/h m<sup>2</sup> °C para el sólido seco (Nonhebel y Moss, 1979), dando el siguiente resultado  $h_f=508,5$  kJ/h m<sup>2</sup> °C.

$$h_p = \frac{U_m h_f}{h_f - U_m}$$

$$h_p = \frac{193,18 * 508,5}{508,5 - 193,18}$$

$$h_p = 311,53 \frac{\text{kJ}}{\text{h m}^2 \text{°C}}$$

Para las simulaciones se utilizó los  $h_p$  de forma individual para cada una de las condiciones de operación. En el numeral 3.2 del Anexo III se muestran los coeficientes de película del banano

#### 4.1.4 Coeficiente de Transferencia de Calor por Convección Natural

Se detalla el caso cuando la  $P_v=60$  psig, cuya  $T_v=150,95$  °C;  $V_{rc}=5$  rpm, y  $b=0,20$  mm, a la presión de Quito 547 mmHg.

Para evaluar el coeficiente de transferencia de calor por convección natural de un cilindro (Holman, 1998), se utilizó la siguiente ecuación porque el producto de  $G_r P_r$  estuvo dentro del rango  $10^4$ - $10^9$ .

$$N_u = 0,53(G_r P_r)^{0,25}$$

Las propiedades del aire se evaluaron a la temperatura de película:

$$T_f = \frac{(T_{ss} + T_a)}{2}$$

$$T_f = \frac{(125,41 + 18)}{2}$$

$$T_f = 71,71 \text{ °C} = 344,71 \text{ °K}$$

El coeficiente de dilatación volumétrica es igual a:

$$\beta = \frac{1}{T_f}$$

$$\beta = \frac{1}{344,71}$$

$$\beta = 2,90 \times 10^{-3} \text{ °K}^{-1}$$

$$G_r = \frac{D_e^2 \Delta T_a \rho_a^2 g \beta}{\mu_a^2}$$

$$G_r = \frac{0,127^3 (398,41 - 291) 0,74^2 * 9,8 * 2,90 \times 10^{-3}}{(2,032 \times 10^{-5})^2}$$

$$G_r = 8,27 \times 10^6$$

$$G_r P_r = 8,27 \times 10^6 * 0,69$$

$$G_r P_r = 5,70 \times 10^6$$

$$N_u = 0,53 (5,70 \times 10^6)^{0,25}$$

$$N_u = 25,90$$

$$N_u = \frac{D_e h}{k_a}$$

$$h = \frac{N_u k_a}{D_e}$$

$$h = \frac{25,90 * 0,107}{0,127}$$

$$h = 21,81 \frac{\text{kJ}}{\text{h m}^2 \text{°C}}$$

En el numeral 3.2 del Anexo III se puede observar los coeficientes de transferencia de calor por convección  $h$  obtenidos, el valor promediado se utilizó en las simulaciones.

## 5. Estimación de la velocidad del aire

La velocidad del aire se calculó considerando la velocidad de secado experimental, y para el cálculo de la presión de saturación se utilizó la ecuación de Antoine (Himmelblau, 2001).

$$\ln P_{sp} = A - \frac{B}{T + C}$$

En un principio se asumió una  $T_{ss}=110$  °C para determinar la velocidad del aire, obteniéndose un valor de 0,0237 m/s con el que se trabajó inicialmente en la simulación.

$$\ln P_{sp} = 18,3036 - \frac{3816,44}{386 + (-43,13)}$$

$$P_{sp} = 1303,40 \text{ mmHg}$$

$$P_{wa} = 15,15 \text{ mmHg}$$

$$N = 4,08 \times 10^{-2} v^{0,8} \Delta P$$

N fue determinada para una  $V_{rc}=5$  rpm,  $P_v=60$  psig y  $b=0,20$  mm

$$v = \sqrt[0,8]{\frac{N}{4,08 \times 10^{-2} * \Delta P}}$$

$$v = \sqrt[0,8]{\frac{2,55}{4,08 \times 10^{-2} * (1303,40 - 15,15)}}$$

$$v = 0,023 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Sin embargo, después de realizar la simulación, para condición operativa se determinó un valor de temperatura de la superficie de secado, que se reemplazó en la ecuación, y se obtuvo un valor diferente de velocidad del aire; por tanto, en cada caso se iteró el valor de la velocidad hasta obtener un valor constante.

Las velocidades del aire obtenidas se promediaron, y se utilizó el promedio en la simulación. En el numeral 3.3 del Anexo III se presentan los valores de la velocidad del aire calculados.

## 6. Factor de área

Se toma el caso  $V_{rc}=6$  rpm;  $P_v=60$  psig y  $b=0,20$  mm

En primer lugar se determinó el número de revoluciones totales a partir de la velocidad de rotación de los tambores y el tiempo de secado:

$$\text{rev} = \text{tss} * V_{rc}$$

$$\text{rev} = 4,36\text{min} * \frac{6\text{rev}}{\text{min}}$$

$$\text{rev} = 26,16$$

De igual manera se calculó las revoluciones para cada condición; no obstante, se halló un valor medio de revoluciones totales. En el numeral del 3.4 del Anexo III se pueden apreciar estos valores.

El factor de área se determinó utilizando el promedio del número de revoluciones, y el ángulo de contacto (ángulo del arco del secador que se encuentra en contacto con la superficie de la película deshidratada). El ángulo de contacto del secador que se utilizó en las pruebas de deshidratación fue de  $208^\circ$ , que fue un parámetro de operación. Sin embargo, debido a que se quiere ofrecer al usuario la posibilidad de trabajar con un ángulo de contacto diferente, el factor de área se determinó de la siguiente manera:

$$\text{Factor de área} = \frac{\text{rev} * 208^\circ}{OC}$$

Pero en este caso concretamente OC es  $208^\circ$

$$\text{Factor de área} = \frac{24,52\text{rev} * 208^\circ}{208^\circ}$$

Por tanto:



**Factor de área = 24,52 rev**

## **7. Relación Longitud/Diámetro**

Las dimensiones del secador son:

L=23,5 cm y D=12,7 cm

$$\frac{L}{D} = h$$

$$\frac{23,5}{12,7} = h$$

$$L = 1,85D$$

## **8. Variación porcentual relativa**

### **8.1 Comparación Balances de masa y energía**

Para las condiciones operativas: Pv=60 psig; Vrc= 6 rpm; b=0,20 mm.

$$\text{Variación \%relativa} = \frac{\text{Flujo del agua evaporada}(\text{balance de energía} - \text{balance de masa})}{\text{Flujo del agua evaporada balance de energía}}$$

$$\text{Variación \%relativa} = \frac{8,33 - 8,09}{8,33} * 100$$

$$\text{Variación \%relativa} = 2,84 \%$$

### **8.2 Comparación resultados simulados y experimentales**

Para las condiciones operativas: Pv=60 psig; Vrc= 6 rpm; b=0,20 mm.

$$\text{Variación \%relativa} = \frac{\text{Velocidad de evaporación del agua(simulación - experimental)}}{\text{Velocidad de evaporación del agua simulación}}$$

$$\text{Variación \%relativa} = \frac{2,74 - 2,80}{2,74} * 100$$

$$\text{Variación \%relativa} = 5,32 \%$$

## 9. Resultados Estadísticos

### 9.1 Intervalo de confianza

El ejemplo de cálculo del intervalo de confianza es para el caso de humedad final a: Pv=60 psig; Vrc= 6 rpm; b=0,20 mm que se muestran en el numeral 2.5. Con una humedad media  $X_f=0,16$  kg H<sub>2</sub>O/kg sólido seco, que corresponde a  $\bar{Y}$ . Mientras que  $Y_j$  corresponde en este caso, a cada uno de los valores de humedad.

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^k f_j (Y_j - \bar{Y})^2}{n - 1}}$$

$$S = \sqrt{\frac{(0,16 - 0,16)^2 + (0,16 - 0,16)^2 + (0,16 - 0,16)^2 + (0,17 - 0,16)^2}{4 - 1}}$$

$$S = 0,01 \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg sólido seco}}$$

Debido a que el tamaño de las muestras es menor que 30, se trabajó con un intervalo de confianza del 99% usando la tabla de distribución tc (Spiegel, 1991).

$$\bar{Y} \pm \frac{t_c * S}{\sqrt{v}}$$

$$v = n - 1$$

$$0,16 \pm \frac{4,03 * 0,01}{\sqrt{4 - 1}}$$

$$0,16 \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg sólido seco}} \pm 0,02 \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg sólido seco}}$$

## 9.2 Contraste de hipótesis para muestras pequeñas: Diferencia de medias.

Se presenta el ejemplo para las áreas de secado obtenidas a:  $P_v=60$  psig;  $V_{rc}=6$  rpm y  $b=0,20$  mm. Como se trata de pequeñas muestras, en lugar de la desviación estándar se utilizó el intervalo de confianza. Donde,  $E_1$  y  $E_2$  son los tamaños de la muestra 1 y 2 respectivamente.

$$t_e = \frac{\bar{Y}_1 - \bar{Y}_2}{\sigma \left[ \sqrt{\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2}} \right]}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{E_1 S_1^2 + E_2 S_2^2}{v}}$$

$$v = E_1 + E_2 - 2$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{5 * 0,59^2 + 5 * 0,04^2}{5 + 5 - 2}}$$

$$t_e = \frac{3,30 - 2,84}{0,47 \left[ \sqrt{\frac{1}{5} + \frac{1}{5}} \right]}$$

$$t_e = 1,55$$

## ANEXO III

## TABLAS DE RESULTADOS

## 1. RESULTADOS PRUEBAS PRELIMINARES

## 1.1 Tiempos de secado y humedad final con sus intervalos de confianza

**Tabla 18.** Valores medios de los tiempos de secado y humedad final:  
Vrc=6 rpm; b=0,20 mm; Variable=Pv

Número de Experimento	Variable		Media		z
	Pv, psig	Tv, °C	ts, min	X <sub>f</sub> , kgH <sub>2</sub> O/kg sólido seco	
5	20 ± 0,5	121,94	4,39 ± 0,04	0,68 ± 0,04	4
4	30 ± 0,5	131,18	4,37 ± 0,02	0,37 ± 0,02	4
3	40 ± 0,5	138,75	4,35 ± 0,02	0,28 ± 0,02	4
2	50 ± 0,5	145,20	4,34 ± 0,02	0,22 ± 0,02	4
1	60 ± 0,5	150,95	4,37 ± 0,04	0,13 ± 0,04	4

**Tabla 19.** Valores medios de los tiempos de secado y humedad final:  
Vrc=6 rpm; Pv=60 psig; Variable=b

Número de Experimento	Variable	Media		z
	b, mm	ts, min	X <sub>f</sub> , kgH <sub>2</sub> O/kg sólido seco	
1	0,20	4,37 ± 0,04	0,13 ± 0,02	4
2	0,30	4,14 ± 0,02	0,28 ± 0,02	4
3	0,40	3,49 ± 0,04	0,58 ± 0,04	4
4	0,50	3,15 ± 0,02	0,71 ± 0,02	4
5	0,60	3,03 ± 0,02	0,97 ± 0,02	4

**Tabla 20.** Valores medios de los tiempos de secado y humedad final:  
b=0,20 mm; Pv=60 psig; Variable=Vrc

Número de Experimento	Variable	Media		z
	Vrc, rpm	ts, min	X <sub>f</sub> , kgH <sub>2</sub> O/kg sólido seco	
3	5 ± 0,5	5,19 ± 0,04	0,09 ± 0,02	4
1	6 ± 0,5	4,38 ± 0,02	0,14 ± 0,02	4
2	7 ± 0,5	3,45 ± 0,04	0,24 ± 0,01	4

## 2. RESULTADOS PRUEBAS DEFINITIVAS

### 2.1 Cantidades de pasta de banano utilizada en la alimentación

**Tabla 21.** Cantidad de pasta de banano: Vrc=6 rpm; b=0,20 mm; Variable=Pv

Número de Experimento	Pv, psig	Tv, °C	Pasta de banano, kg					
			Primera Prueba		Segunda Prueba		Media	Intervalo de confianza
			1	2	1	2		
5	20 ± 0,5	121,94	0,828	0,828	0,833	0,833	0,831	0,020
4	30 ± 0,5	131,18	0,827	0,827	0,831	0,831	0,829	0,016
3	40 ± 0,5	138,75	0,823	0,823	0,829	0,829	0,826	0,024
2	50 ± 0,5	145,20	0,829	0,829	0,802	0,802	0,816	0,109
1	60 ± 0,5	150,95	0,841	0,841	0,819	0,819	0,830	0,089

**Tabla 22.** Cantidad de pasta de banano: Vrc=6 rpm; Pv=60 psig; Variable=b

Número de Experimento	b, mm	Pasta de banano, kg					
		Primera Prueba		Segunda Prueba		Media	Intervalo de confianza
		1	2	1	2		
1	0,20	0,841	0,841	0,819	0,819	0,830	0,024
2	0,30	0,832	0,832	0,831	0,831	0,832	0,004
3	0,40	0,830	0,830	0,839	0,839	0,835	0,036
4	0,50	0,815	0,815	0,812	0,812	0,814	0,012
5	0,60	0,824	0,824	0,838	0,838	0,831	0,057

**Tabla 23.** Cantidad de pasta de banano:  $b=0,20$  mm;  $P_v=60$  psig; Variable= $V_{rc}$ 

Número de Experimento	$V_{rc}$ , rpm	Pasta de banano, kg					
		Primera Prueba		Segunda Prueba		Media	Intervalo de confianza
		1	2	1	2		
3	$5 \pm 0,5$	0,845	0,845	0,854	0,854	0,850	0,036
1	$6 \pm 0,5$	0,841	0,841	0,819	0,819	0,830	0,089
2	$7 \pm 0,5$	0,815	0,815	0,805	0,805	0,810	0,040

## 2.2 Pesos de las películas deshidratadas

**Tabla 24.** Peso de la película deshidratada:  $V_{rc}=6$  rpm;  $b=0,20$  mm; Variable= $P_v$ 

Número de Experimento	$P_v$ , psig	$T_v$ , °C	Peso de la película deshidratada, kg					
			Primera Prueba		Segunda Prueba		Media	Intervalo de confianza
			1	2	1	2		
5	$20 \pm 0,5$	121,94	0,380	0,380	0,391	0,391	0,386	0,044
4	$30 \pm 0,5$	131,18	0,301	0,301	0,313	0,313	0,307	0,049
3	$40 \pm 0,5$	138,75	0,267	0,267	0,279	0,279	0,273	0,049
2	$50 \pm 0,5$	145,20	0,256	0,256	0,260	0,260	0,258	0,016
1	$60 \pm 0,5$	150,95	0,233	0,233	0,233	0,233	0,233	0,000

**Tabla 25.** Peso de la película deshidratada:  $V_{rc}=6$  rpm;  $P_v=60$  psig; Variable= $b$ 

Número de Experimento	$b$ , mm	Peso de la película deshidratada, kg					
		Primera Prueba		Segunda Prueba		Media	Intervalo de confianza
		1	2	1	2		
1	0,20	0,233	0,233	0,233	0,233	0,233	0,000
2	0,30	0,263	0,263	0,275	0,275	0,269	0,049
3	0,40	0,331	0,331	0,335	0,335	0,333	0,016
4	0,50	0,358	0,358	0,364	0,364	0,361	0,024
5	0,60	0,448	0,448	0,410	0,410	0,429	0,049

**Tabla 26.** Peso de la película deshidratada:  $b=0,20$  mm;  $P_v=60$  psig; Variable= $V_{rc}$ 

Número de Experimento	$V_{rc}$ , rpm	Peso de la película deshidratada, kg					
		Primera Prueba		Segunda Prueba		Media	Intervalo de confianza
		1	2	1	2		
3	$5 \pm 0,5$	0,217	0,217	0,217	0,217	0,217	0,000
1	$6 \pm 0,5$	0,233	0,233	0,233	0,233	0,233	0,000
2	$7 \pm 0,5$	0,255	0,255	0,255	0,255	0,255	0,000

### 2.3 Pesos de condensado

**Tabla 27.** Peso del condensado:  $V_{rc}=6$  rpm;  $b=0,20$  mm; Variable= $P_v$ 

Número de Experimento	$P_v$ , psig	$T_v$ , °C	Peso del condensado, kg					
			Primera Prueba		Segunda Prueba		Media	Intervalo de confianza
			1	2	1	2		
5	$20 \pm 0,5$	121,94	0,495	0,495	0,545	0,545	0,520	0,202
4	$30 \pm 0,5$	131,18	0,605	0,605	0,635	0,635	0,620	0,121
3	$40 \pm 0,5$	138,75	0,639	0,639	0,631	0,631	0,635	0,032
2	$50 \pm 0,5$	145,20	0,665	0,665	0,657	0,657	0,661	0,032
1	$60 \pm 0,5$	150,95	0,646	0,646	0,694	0,694	0,670	0,194

**Tabla 28.** Peso del condensado:  $V_{rc}=6$  rpm;  $P_v=60$  psig; Variable= $b$ 

Número de Experimento	$b$ , mm	Peso del condensado, kg					
		Primera Prueba		Segunda Prueba		Media	Intervalo de confianza
		1	2	1	2		
1	0,20	0,646	0,646	0,694	0,694	0,670	0,194
2	0,30	0,617	0,617	0,673	0,673	0,645	0,227
3	0,40	0,561	0,561	0,609	0,609	0,585	0,194
4	0,50	0,532	0,532	0,538	0,538	0,535	0,024
5	0,60	0,519	0,519	0,451	0,451	0,485	0,275

**Tabla 29.** Peso del condensado:  $b=0,20$  mm;  $P_v=60$  psig; Variable= $V_{rc}$ 

Número de Experimento	$V_{rc}$ , rpm	Peso del condensado, kg					
		Primera Prueba		Segunda Prueba		Media	Intervalo de confianza
		1	2	1	2		
3	$5 \pm 0,5$	0,698	0,698	0,702	0,702	0,700	0,016
1	$6 \pm 0,5$	0,646	0,646	0,694	0,694	0,670	0,194
2	$7 \pm 0,5$	0,615	0,615	0,665	0,665	0,640	0,202

## 2.4 Tiempos de secado

**Tabla 30.** Tiempo de secado:  $V_{rc}=6$  rpm;  $b=0,20$  mm; Variable= $P_v$ 

Número de Experimento	$P_v$ , psig	$T_v$ , °C	$t_s$ , min					
			Primera Prueba		Segunda Prueba		Media	Intervalo de confianza
			1	2	1	2		
5	$20 \pm 0,5$	121,94	4,40	4,40	4,41	4,41	4,41	0,04
4	$30 \pm 0,5$	131,18	4,37	4,37	4,28	4,28	4,33	0,36
3	$40 \pm 0,5$	138,75	4,34	4,34	4,38	4,38	4,36	0,16
2	$50 \pm 0,5$	145,20	4,31	4,31	4,40	4,40	4,36	0,36
1	$60 \pm 0,5$	150,95	4,38	4,38	4,33	4,33	4,36	0,20

**Tabla 31.** Tiempo de secado:  $V_{rc}=6$  rpm;  $P_v=60$  psig; Variable= $b$ 

Número de Experimento	$b$ , mm	$t_s$ , min					
		Primera Prueba		Segunda Prueba		Media	Intervalo de confianza
		1	2	1	2		
1	0,20	4,38	4,38	4,33	4,33	4,36	0,20
2	0,30	4,15	4,15	4,13	4,13	4,14	0,08
3	0,40	3,53	3,53	3,48	3,48	3,51	0,20
4	0,50	3,15	3,15	3,15	3,15	3,15	0,00
5	0,60	3,08	3,08	2,92	2,92	3,00	0,65



**Tabla 32.** Tiempo de secado:  $b=0,20$  mm;  $P_v=60$  psig; Variable= $V_{rc}$ 

Número de Experimento	$V_{rc}$ , rpm	ts, min					
		Primera Prueba		Segunda Prueba		Media	Intervalo de confianza
		1	2	1	2		
3	$5 \pm 0,5$	5,14	5,14	5,20	5,20	5,17	0,24
1	$6 \pm 0,5$	4,38	4,38	4,33	4,33	4,36	0,20
2	$7 \pm 0,5$	3,53	3,53	3,49	3,49	3,51	0,16

## 2.5 Humedad final

**Tabla 33.** Humedad final:  $V_{rc}=6$  rpm;  $b=0,20$  mm; Variable= $P_v$ 

Número de Experimento	$P_v$ , psig	$T_v$ , °C	$X_f$ , kgH <sub>2</sub> O/kg sólido seco					
			Primera Prueba		Segunda Prueba		Media	Intervalo de confianza
			1	2	1	2		
5	$20 \pm 0,5$	121,94	0,79	0,76	0,77	0,80	0,78	0,04
4	$30 \pm 0,5$	131,18	0,42	0,44	0,42	0,44	0,43	0,03
3	$40 \pm 0,5$	138,75	0,27	0,29	0,25	0,28	0,27	0,04
2	$50 \pm 0,5$	145,20	0,22	0,21	0,17	0,21	0,20	0,05
1	$60 \pm 0,5$	150,95	0,16	0,16	0,16	0,17	0,16	0,02

**Tabla 34.** Humedad final:  $V_{rc}=6$  rpm;  $P_v=60$  psig; Variable= $b$ 

Número de Experimento	$b$ , mm	$X_f$ , kgH <sub>2</sub> O/kg sólido seco					
		Primera Prueba		Segunda Prueba		Media	Intervalo de confianza
		1	2	1	2		
1	0,20	0,16	0,16	0,16	0,17	0,16	0,02
2	0,30	0,19	0,26	0,29	0,28	0,25	0,03
3	0,40	0,53	0,56	0,57	0,54	0,55	0,04
4	0,50	0,66	0,69	0,67	0,70	0,68	0,04
5	0,60	1,00	1,01	0,96	1,01	1,00	0,06

**Tabla 35.** Humedad final: Pv = 60 psig; b=0,20 mm; Variable=Vrc

Número de Experimento	Vrc, rpm	X <sub>f</sub> , kgH <sub>2</sub> O/kg sólido seco					
		Primera Prueba		Segunda Prueba		Media	Intervalo de confianza
		1	2	1	2		
3	5 ± 0,5	0,11	0,11	0,13	0,13	0,12	0,02
1	6 ± 0,5	0,16	0,16	0,16	0,17	0,16	0,02
2	7 ± 0,5	0,24	0,27	0,29	0,28	0,27	0,05

## 2.6 Flujos de agua evaporada obtenidos del balance de masa y energía

**Tabla 36.** Flujo másico del agua evaporada: Vrc=6 rpm; b=0,20 mm; Variable=Pv

Pv, psig	Tv, °C	X <sub>f</sub> , kg H <sub>2</sub> O/kg sólido seco	m <sub>H<sub>2</sub>O</sub> , kg H <sub>2</sub> O/h		Variación Porcentual Relativa, %
			Balance de masa	Balance de energía	
20 ± 0,5	121,94	0,78	6,15	6,64	5,61
30 ± 0,5	131,18	0,43	7,41	7,99	5,83
40 ± 0,5	138,75	0,27	7,77	8,03	3,60
50 ± 0,5	145,20	0,20	7,84	8,28	5,32
60 ± 0,5	150,95	0,16	8,09	8,33	2,84

**Tabla 37.** Flujo másico de evaporación del agua: Vrc=6 rpm; Pv=60 psig; Variable=b

b, mm	X <sub>f</sub> , kg H <sub>2</sub> O/kg sólido seco	m <sub>H<sub>2</sub>O</sub> , kg H <sub>2</sub> O/h		Variación Porcentual Relativa, %
		Balance de masa	Balance de energía	
0,20	0,16	8,09	8,33	2,84
0,30	0,25	8,23	8,44	2,64
0,40	0,55	8,64	9,04	4,41
0,50	0,68	8,80	9,22	4,53
0,60	1,00	8,66	8,76	1,17

**Tabla 38.** Flujo másico de evaporación del agua:  $b=0,20$  mm;  $P_v=60$  psig; Variable= $V_{rc}$ 

$V_{rc}$ , rpm	$X_b$ , kg H <sub>2</sub> O/kg sólido seco	$m_{\dot{H}_2O}$ , kg H <sub>2</sub> O/h		Variación Porcentual Relativa, %
		Balance de masa	Balance de energía	
$5 \pm 0,5$	0,12	7,10	7,32	2,95
$6 \pm 0,5$	0,16	8,09	8,33	2,84
$7 \pm 0,5$	0,27	9,48	9,97	5,00

## 2.7 Velocidad de evaporación del agua obtenidos del balance de masa y energía

**Tabla 39.** Velocidad de evaporación del agua:  $V_{rc}=6$  rpm;  $b=0,20$  mm; Variable= $P_v$ 

$P_v$ , psig	$T_v$ , °C	$A_h$ , m <sup>2</sup>	$N$ , kg H <sub>2</sub> O/h m <sup>2</sup>		Variación Porcentual Relativa, %
			Balance de masa	Balance de energía	
$20 \pm 0,5$	121,94	2,87	2,17	2,31	6,22
$30 \pm 0,5$	131,18	2,82	2,60	2,83	8,08
$40 \pm 0,5$	138,75	2,84	2,72	2,83	3,83
$50 \pm 0,5$	145,20	2,84	2,76	2,92	5,48
$60 \pm 0,5$	149,95	2,84	2,84	2,93	2,98

**Tabla 40.** Velocidad de evaporación del agua:  $V_{rc}=6$  rpm;  $P_v=60$  psig; Variable= $b$ 

$b$ , mm	$A_h$ , m <sup>2</sup>	$N$ , kg H <sub>2</sub> O/h m <sup>2</sup>		Variación Porcentual Relativa, %
		Balance de masa	Balance de energía	
0,20	2,84	2,91	3,10	2,98
0,30	2,70	3,13	3,32	2,29
0,40	2,29	3,87	4,23	3,95
0,50	2,05	4,54	4,81	3,17
0,60	1,95	4,31	4,80	6,10

**Tabla 41.** Velocidad de evaporación del agua:  $b=0,20$  mm;  $P_v=60$  psig; Variable= $V_{rc}$ 

$V_{rc}$ , rpm	$A_b$ , $m^2$	N, kg $H_2O/h m^2$		Variación Porcentual Relativa, %
		Balace de masa	Balace de energía	
$5 \pm 0,5$	2,81	2,52	2,61	3,26
$6 \pm 0,5$	2,84	2,91	2,93	2,98
$7 \pm 0,5$	2,84	3,49	3,51	5,08

### 3. DIMENSIONAMIENTO

#### 3.1.1 Velocidad de evaporación del agua

**Tabla 42.** Velocidad de evaporación experimental y simulada del agua:  $V_{rc}=6$  rpm;  $b=0,20$  mm; Variable= $P_v$ 

$P_v$ , psig	$T_v$ , °C	N, kg $H_2O/h m^2$		Variación Porcentual Relativa, %
		Experimental	Simulada	
$20 \pm 0,5$	121,94	2,17	1,75	23,81
$30 \pm 0,5$	131,18	2,60	2,14	21,59
$40 \pm 0,5$	138,75	2,72	2,37	14,71
$50 \pm 0,5$	145,20	2,76	2,53	8,92
$60 \pm 0,5$	149,95	2,84	2,70	5,32

**Tabla 43.** Velocidad de evaporación experimental y simulada del agua:  $V_{rc}=6$  rpm;  $P_v=60$  psig; Variable= $b$ 

$b$ , mm	N, kg $H_2O/h m^2$		Variación Porcentual Relativa, %
	Experimental	Simulada	
0,20	2,84	2,70	5,32
0,30	3,06	2,86	6,92
0,40	3,80	3,35	13,34
0,50	4,35	3,70	17,51

**Tabla 44.** Velocidad de evaporación experimental y simulada del agua:  $b=0,20$  mm;  $P_v=60$  psig; Variable= $V_{rc}$

<b>Vrc, rpm</b>	<b>N, kg H<sub>2</sub>O/h m<sup>2</sup></b>		<b>Variación Porcentual Relativa, %</b>
	<b>Experimental</b>	<b>Simulada</b>	
$5 \pm 0,5$	2,52	2,47	2,06
$6 \pm 0,5$	2,84	2,75	3,40
$7 \pm 0,5$	3,33	3,04	9,50

### 3.1.2 Temperatura de la superficie de secado

**Tabla 45.** Temperatura de la superficie de secado:  $V_{rc}=6$  rpm;  $b=0,20$  mm; Variable= $P_v$

<b>Pv, psig</b>	<b>Tv, °C</b>	<b>N simulada, kg H<sub>2</sub>O/h m<sup>2</sup></b>	<b>Tss simulada, °C</b>
$20 \pm 0,5$	121,94	1,75	114,7
$30 \pm 0,5$	131,18	2,14	120,92
$40 \pm 0,5$	138,75	2,37	124,20
$50 \pm 0,5$	145,20	2,53	126,23
$60 \pm 0,5$	149,95	2,70	128,38

**Tabla 46.** Temperatura de la superficie de secado:  $V_{rc}=6$  rpm;  $P_v=60$  psig; Variable= $b$

<b>b, mm</b>	<b>N simulada, kg H<sub>2</sub>O/h m<sup>2</sup></b>	<b>Tss simulada, °C</b>
0,20	2,70	128,40
0,30	2,86	130,20
0,40	3,35	135,61
0,50	3,70	139,00

**Tabla 47.** Temperatura de la superficie de secado:  $b=0,20$  mm;  $P_v=60$  psig; Variable= $V_{rc}$ 

$V_{rc}$ , rpm	N simulada, kg H <sub>2</sub> O/h m <sup>2</sup>	T <sub>ss</sub> simulada, °C
5 ± 0,5	2,47	125,40
6 ± 0,5	2,75	128,40
7 ± 0,5	3,04	132,32

### 3.1.3 Flujo másico del agua evaporada

#### SETA I

##### 3.1.3.1 Parámetro de entrada: Flujo másico de producción

**Tabla 48.** Flujo másico del agua evaporada experimental y simulado:  $V_{rc}=6$  rpm;  $b=0,20$  mm; Variable= $P_v$ 

$P_v$ , psig	$T_v$ , °C	$m_{H_2O}$ , kg H <sub>2</sub> O/h		Variación Porcentual Relativa, %
		Experimental	Simulado	
20 ± 0,5	121,94	6,27	6,43	2,54
30 ± 0,5	131,18	7,52	6,94	8,37
40 ± 0,5	138,75	7,74	7,20	7,53
50 ± 0,5	145,20	7,84	7,57	3,59
60 ± 0,5	149,95	8,09	7,75	4,42

**Tabla 49.** Flujo másico del agua evaporada experimental y simulado:  $V_{rc}=6$  rpm;  $P_v=60$  psig; Variable= $b$ 

$b$ , mm	$m_{H_2O}$ , kg H <sub>2</sub> O/h		Variación Porcentual Relativa, %
	Experimental	Simulado	
0,20	8,09	7,75	4,42
0,30	8,22	8,46	2,83
0,40	8,64	8,85	2,35
0,50	8,80	9,34	5,80

**Tabla 50.** Flujo másico del agua evaporada experimental y simulado:  $b=0,20$  mm;  $P_v=60$  psig; Variable= $V_{rc}$

Vrc, rpm	$\dot{m}_{H_2O}$ , kg H <sub>2</sub> O/h		Variación Porcentual Relativa, %
	Experimental	Simulado	
$5 \pm 0,5$	7,10	6,39	11,11
$6 \pm 0,5$	8,09	7,75	4,41
$7 \pm 0,5$	9,47	9,28	2,08

### 3.1.4 Flujo másico de producción:

#### SETA II

#### 3.1.4.1 Parámetro de entrada: Flujo másico del agua evaporada

**Tabla 51.** Flujo másico de producción experimental y simulado:  $V_{rc}=6$  rpm;  $b=0,20$  mm; Variable= $P_v$

Pv, psig	Tv, °C	$\dot{m}_p$ , kg producto seco/h		Variación Porcentual Relativa, %
		Experimental	Simulado	
$20 \pm 0,5$	121,94	5,25	5,12	2,57
$30 \pm 0,5$	131,18	3,92	4,25	7,73
$40 \pm 0,5$	138,75	3,40	3,65	6,87
$50 \pm 0,5$	145,20	3,29	3,41	3,55
$60 \pm 0,5$	149,95	3,21	3,35	4,34

**Tabla 52.** Flujo másico de producción experimental y simulado:  $V_{rc}=6$  rpm;  $P_v=60$  psig; Variable= $b$

b, mm	$\dot{m}_p$ , kg producto seco/h		Variación Porcentual Relativa, %
	Experimental	Simulado	
0,20	3,21	3,35	4,29
0,30	3,90	3,79	2,86
0,40	5,69	5,56	2,38
0,50	6,88	6,48	6,11

**Tabla 53.** Flujo másico de producción experimental y simulado:  $b=0,20$  mm;  $P_v=60$  psig; Variable= $V_{rc}$

Vrc, rpm	$\dot{m}_p$ , kg producto seco/h		Variación Porcentual Relativa, %
	Experimental	Simulado	
$5 \pm 0,5$	2,52	2,80	10,00
$6 \pm 0,5$	3,21	3,35	4,29
$7 \pm 0,5$	4,38	4,47	1,92

### 3.1.5 Área de la película deshidratada

#### SETA I

##### 3.1.5.1 Parámetro de entrada: Flujo másico de producción

**Tabla 54.** Área de la película deshidratada experimental y simulada:  $V_{rc}=6$  rpm;  $b=0,20$  mm; Variable= $P_v$

Pv, psig	Tv, °C	$A_h$ , m <sup>2</sup>		Variación Porcentual Relativa, %
		Experimental	Simulada	
$20 \pm 0,5$	121,94	2,87	3,68	21,91
$30 \pm 0,5$	131,18	2,82	3,24	12,92
$40 \pm 0,5$	138,75	2,84	3,04	6,55
$50 \pm 0,5$	145,20	2,84	3,00	5,30
$60 \pm 0,5$	149,95	2,84	2,87	1,01

**Tabla 55.** Área de la película deshidratada experimental y simulada:  $V_{rc}=6$  rpm;  $P_v=60$  psig; Variable= $b$

b, mm	$A_h$ , m <sup>2</sup>		Variación Porcentual Relativa, %
	Experimental	Simulada	
0,20	2,84	2,87	1,01
0,30	2,70	2,96	8,86
0,40	2,29	2,64	13,37
0,50	2,05	2,52	18,55



**Tabla 56.** Área de la película deshidratada experimental y simulada:  $b=0,20$  mm;  $P_v=60$  psig; Variable= $V_{rc}$

Vrc, rpm	$A_h, m^2$		Variación Porcentual Relativa, %
	Experimental	Simulada	
$5 \pm 0,5$	2,81	2,59	8,41
$6 \pm 0,5$	2,84	2,87	1,05
$7 \pm 0,5$	2,84	3,05	6,89

## SETA II

### 3.1.5.2 Parámetro de entrada: Flujo másico del agua evaporada

**Tabla 57.** Área de la película deshidratada experimental y simulada:  $V_{rc}=6$  rpm;  $b=0,20$  mm; Variable= $P_v$

Pv, psig	Tv, °C	$A_h, m^2$		Variación Porcentual Relativa, %
		Experimental	Simulada	
$20 \pm 0,5$	121,94	2,87	3,60	20,18
$30 \pm 0,5$	131,18	2,82	3,50	19,39
$40 \pm 0,5$	138,75	2,84	3,30	13,91
$50 \pm 0,5$	145,20	2,84	3,10	8,36
$60 \pm 0,5$	149,95	2,84	3,00	5,30

**Tabla 58.** Área de la película deshidratada experimental y simulada:  $V_{rc}=6$  rpm;  $P_v=60$  psig; Variable= $b$

b, mm	$A_h, m^2$		Variación Porcentual Relativa, %
	Experimental	Simulada	
0,20	2,84	3,00	5,30
0,30	2,70	2,90	6,98
0,40	2,29	2,60	12,03
0,50	2,05	2,40	14,48

**Tabla 59.** Área de la película deshidratada experimental y simulada:  
 $b=0,20$  mm;  $P_v=60$  psig; Variable= $V_{rc}$

Vrc, rpm	$A_h, m^2$		Variación Porcentual Relativa, %
	Experimental	Simulada	
$5 \pm 0,5$	2,81	2,90	3,10
$6 \pm 0,5$	2,84	3,00	5,33
$7 \pm 0,5$	2,84	3,11	8,68

### 3.1.6 Área nominal de los tambores

#### SETA I

#### 3.1.6.1 Parámetro de entrada: Flujo másico de producción

**Tabla 60.** Área nominal de los tambores del secador experimental y simulada:  $V_{rc}=6$  rpm;  
 $b=0,20$  mm; Variable= $P_v$

Pv, psig	Tv, °C	$A_c, m^2$		Variación Porcentual Relativa, %
		Experimental	Simulada	
$20 \pm 0,5$	121,94	0,19	0,26	27,83
$30 \pm 0,5$	131,18	0,19	0,23	17,98
$40 \pm 0,5$	138,75	0,19	0,21	12,51
$50 \pm 0,5$	145,20	0,19	0,21	11,22
$60 \pm 0,5$	149,95	0,19	0,20	7,36

**Tabla 61.** Área nominal de los tambores del secador experimental y simulada:  
 $V_{rc}=6$  rpm;  $P_v=60$  psig; Variable= $b$

b, mm	$A_c, m^2$		Variación Porcentual Relativa, %
	Experimental	Simulada	
0,20	0,19	0,20	7,36
0,30	0,19	0,21	10,29
0,40	0,19	0,19	0,64
0,50	0,19	0,18	5,22

**Tabla 62.** Área nominal de los tambores del secador experimental y simulada:  
 $b=0,20$  mm;  $P_v=60$  psig; Variable= $V_{rc}$

Vrc, rpm	A <sub>C</sub> , m <sup>2</sup>		Variación Porcentual Relativa, %
	Experimental	Simulada	
5 ± 0,5	0,19	0,18	2,40
6 ± 0,5	0,19	0,20	7,36
7 ± 0,5	0,19	0,21	9,73

## SETA II

### 3.1.6.2 Parámetro de entrada: Flujo másico del agua evaporada

**Tabla 63.** Área nominal de los tambores del secador experimental y simulada:  $V_{rc}=6$  rpm;  
 $b=0,20$  mm; Variable= $P_v$

P <sub>v</sub> , psig	T <sub>v</sub> , °C	A <sub>C</sub> , m <sup>2</sup>		Variación Porcentual Relativa, %
		Experimental	Simulada	
20 ± 0,5	121,94	0,19	0,25	25,98
30 ± 0,5	131,18	0,19	0,25	24,36
40 ± 0,5	138,75	0,19	0,23	18,58
50 ± 0,5	145,20	0,19	0,21	14,31
60 ± 0,5	149,95	0,19	0,21	11,26

**Tabla 64.** Área nominal de los tambores del secador experimental y simulada:  
 $V_{rc}=6$  rpm;  $P_v=60$  psig; Variable= $b$

b, mm	A <sub>C</sub> , m <sup>2</sup>		Variación Porcentual Relativa, %
	Experimental	Simulada	
0,20	0,19	0,21	11,26
0,30	0,19	0,20	7,73
0,40	0,19	0,18	3,08
0,50	0,19	0,17	11,61

**Tabla 65.** Área nominal de los tambores del secador experimental y simulada:  
 $b=0,20$  mm;  $P_v=60$  psig; Variable= $V_{rc}$

Vrc, rpm	$A_C, m^2$		Variación Porcentual Relativa, %
	Experimental	Simulada	
$5 \pm 0,5$	0,19	0,20	7,86
$6 \pm 0,5$	0,19	0,21	11,26
$7 \pm 0,5$	0,19	0,22	14,66

### 3.1.7 Flujo de vapor

#### SETA I

##### 3.1.7.1 Parámetro de entrada: Flujo másico de producción

**Tabla 66.** Flujo másico del vapor experimental y simulado:  $V_{rc}=6$  rpm;  
 $b=0,20$  mm; Variable= $P_v$

Pv, psig	Tv, °C	$\dot{m}_v, \text{ kg vapor/h}$		Variación Porcentual Relativa, %
		Experimental	Simulado	
$20 \pm 0,5$	121,94	7,07	10,00	29,25
$30 \pm 0,5$	131,18	8,59	10,36	17,07
$40 \pm 0,5$	138,75	8,74	10,60	17,56
$50 \pm 0,5$	145,20	9,10	11,06	17,75
$60 \pm 0,5$	149,95	9,22	11,25	18,04

**Tabla 67.** Flujo másico del vapor evaporada experimental y simulado:  $V_{rc}=6$  rpm;  
 $P_v=60$  psig; Variable= $b$

b, mm	$\dot{m}_v, \text{ kg vapor/h}$		Variación Porcentual Relativa, %
	Experimental	Simulado	
0,20	9,22	11,25	18,04
0,30	9,35	12,12	22,87
0,40	10,00	12,23	18,23
0,50	10,19	12,64	19,38

**Tabla 68.** Flujo másico del vapor evaporada experimental y simulado:  $b=0,20$  mm;  $P_v=60$  psig; Variable= $V_{rc}$

Vrc, rpm	$\dot{m}_v$ , kg vapor/h		Variación Porcentual Relativa, %
	Experimental	Simulado	
$5 \pm 0,5$	8,12	9,48	14,35
$6 \pm 0,5$	9,22	11,20	17,68
$7 \pm 0,5$	11,00	13,00	15,36

## SETA II

### 3.1.7.2 Parámetro de entrada: Flujo másico del agua evaporada

**Tabla 69.** Flujo másico del vapor experimental y simulado:  $V_{rc}=6$  rpm;  $b=0,20$  mm; Variable= $P_v$

Pv, psig	Tv, °C	$\dot{m}_v$ , kg vapor/h		Variación Porcentual Relativa, %
		Experimental	Simulado	
$20 \pm 0,5$	121,94	7,07	9,75	27,44
$30 \pm 0,5$	131,18	8,59	11,23	23,50
$40 \pm 0,5$	138,75	8,74	11,40	24,67
$50 \pm 0,5$	145,20	9,10	11,50	20,90
$60 \pm 0,5$	149,95	9,22	11,74	21,46

**Tabla 70.** Flujo másico del vapor evaporada experimental y simulado:  $V_{rc}=6$  rpm;  $P_v=60$  psig; Variable= $b$

b, mm	$\dot{m}_v$ , kg vapor/h		Variación Porcentual Relativa, %
	Experimental	Simulado	
0,20	9,22	11,40	19,12
0,30	9,35	11,80	20,78
0,40	10,00	11,90	15,97
0,50	10,19	11,91	14,44

**Tabla 71.** Flujo másico del vapor evaporada experimental y simulado:  $b=0,20$  mm;  
 $P_v=60$  psig; Variable= $V_{rc}$

Vrc, rpm	$\dot{m}_v$ , kg vapor/h		Variación Porcentual Relativa, %
	Experimental	Simulado	
$5 \pm 0,5$	8,12	10,54	22,96
$6 \pm 0,5$	9,22	11,74	21,46
$7 \pm 0,5$	11,00	13,40	17,89

### 3.1.8 Consumo de vapor específico

#### SETA I

##### 3.1.8.1 Parámetro de entrada: Flujo másico de producción

**Tabla 72.** Consumo de vapor específico experimental y simulado:  $V_{rc}=6$  rpm;  
 $b=0,20$  mm; Variable= $P_v$

Pv, psig	Tv, °C	$C_v$ , kg vapor/kg H <sub>2</sub> O evaporada		Variación Porcentual Relativa, %
		Experimental	Simulado	
$20 \pm 0,5$	121,94	1,13	1,55	27,16
$30 \pm 0,5$	131,18	1,14	1,48	23,85
$40 \pm 0,5$	138,75	1,13	1,47	23,22
$50 \pm 0,5$	145,20	1,16	1,46	20,55
$60 \pm 0,5$	149,95	1,14	1,45	21,40

**Tabla 73.** Consumo de vapor específico experimental y simulado:  $V_{rc}=6$  rpm;  
 $P_v=60$  psig; Variable= $b$

b, mm	$C_v$ , kg vapor/ kg H <sub>2</sub> O evaporada		Variación Porcentual Relativa, %
	Experimental	Simulado	
0,20	1,14	1,45	21,40
0,30	1,14	1,43	20,48
0,40	1,16	1,38	16,15
0,50	1,16	1,35	14,21

**Tabla 74.** Consumo de vapor específico experimental y simulado:  $b=0,20$  mm;  
 $P_v=60$  psig; Variable= $V_{rc}$

<b>V<sub>rc</sub>, rpm</b>	<b>C<sub>v</sub>, kg vapor/ kg H<sub>2</sub>O evaporada</b>		<b>Variación Porcentual Relativa, %</b>
	<b>Experimental</b>	<b>Simulado</b>	
5 ± 0,5	1,14	1,48	22,97
6 ± 0,5	1,11	1,45	23,26
7 ± 0,5	1,10	1,40	21,43

## SETA II

### 3.1.8.2 Parámetro de entrada: Flujo másico del agua evaporada

**Tabla 75.** Consumo de vapor específico experimental y simulado:  $V_{rc}=6$  rpm;  
 $b=0,20$  mm; Variable= $P_v$

<b>P<sub>v</sub>, psig</b>	<b>T<sub>v</sub>, °C</b>	<b>C<sub>v</sub>, kg vapor/kg H<sub>2</sub>O evaporada</b>		<b>Variación Porcentual Relativa, %</b>
		<b>Experimental</b>	<b>Simulado</b>	
20 ± 0,5	121,94	1,13	1,55	27,16
30 ± 0,5	131,18	1,14	1,48	22,82
40 ± 0,5	138,75	1,13	1,47	23,22
50 ± 0,5	145,20	1,16	1,46	20,55
60 ± 0,5	149,95	1,14	1,45	21,40

**Tabla 76.** Consumo de vapor específico experimental y simulado:  $V_{rc}=6$  rpm;  
 $P_v=60$  psig; Variable= $b$

<b>b, mm</b>	<b>C<sub>v</sub>, kg vapor/ kg H<sub>2</sub>O evaporada</b>		<b>Variación Porcentual Relativa, %</b>
	<b>Experimental</b>	<b>Simulado</b>	
0,20	1,14	1,45	21,40
0,30	1,14	1,43	20,48
0,40	1,16	1,38	16,15
0,50	1,16	1,35	14,21

**Tabla 77.** Consumo de vapor específico experimental y simulado:  $b=0,20$  mm;  
 $P_v=60$  psig; Variable= $V_{rc}$

Vrc, rpm	C <sub>v</sub> , kg vapor/ kg H <sub>2</sub> O evaporada		Variación Porcentual Relativa, %
	Experimental	Simulado	
5 ± 0,5	1,14	1,48	22,97
6 ± 0,5	1,11	1,45	23,26
7 ± 0,5	1,10	1,40	21,43

### 3.1.9 Velocidad de producción

#### SETA I

#### 3.1.9.1 Parámetro de entrada: Flujo másico de producción

**Tabla 78.** Velocidad de producción experimental y simulada:  $V_{rc}=6$  rpm;  
 $b=0,20$  mm; Variable= $P_v$

P <sub>v</sub> , psig	T <sub>v</sub> , °C	m <sub>pa</sub> , kg producto seco/h m <sup>2</sup>		Variación Porcentual Relativa, %
		Experimental	Simulada	
20 ± 0,5	121,94	1,83	1,44	26,92
30 ± 0,5	131,18	1,39	1,23	13,00
40 ± 0,5	138,75	1,20	1,14	4,95
50 ± 0,5	145,20	1,16	1,13	2,45
60 ± 0,5	149,95	1,13	1,14	1,00

**Tabla 79.** Velocidad de producción experimental y simulada:  $V_{rc}=6$  rpm;  
 $P_v=60$  psig; Variable= $b$

b, mm	m <sub>pa</sub> , kg producto seco/h m <sup>2</sup>		Variación Porcentual Relativa, %
	Experimental	Simulada	
0,20	1,13	1,14	1,00
0,30	1,45	1,34	7,85
0,40	2,49	2,10	13,65
0,50	3,35	3,17	19,22



**Tabla 80.** Velocidad de producción experimental y simulada:  $b=0,20$  mm;  
 $P_v=60$  psig; Variable= $V_{rc}$

$V_{rc}$ , rpm	$\dot{m}_{pa}$ , kg producto seco/h m <sup>2</sup>		Variación Porcentual Relativa, %
	Experimental	Simulada	
$5 \pm 0,5$	0,90	0,97	7,73
$6 \pm 0,5$	1,13	1,14	0,94
$7 \pm 0,5$	1,54	1,49	3,32

## SETA II

### 3.1.9.2 Parámetro de entrada: Flujo másico del agua evaporada

**Tabla 81.** Velocidad de producción experimental y simulada:  $V_{rc}=6$  rpm;  
 $b=0,20$  mm; Variable= $P_v$

$P_v$ , psig	$T_v$ , °C	$\dot{m}_{pa}$ , kg producto seco/h m <sup>2</sup>		Variación Porcentual Relativa, %
		Experimental	Simulada	
$20 \pm 0,5$	121,94	1,83	1,44	27,80
$30 \pm 0,5$	131,18	1,39	1,23	24,61
$40 \pm 0,5$	138,75	1,20	1,14	18,07
$50 \pm 0,5$	145,20	1,16	1,13	13,61
$60 \pm 0,5$	149,95	1,13	1,14	0,77

**Tabla 82.** Velocidad de producción experimental y simulada:  $V_{rc}=6$  rpm;  
 $P_v=60$  psig; Variable= $b$

$b$ , mm	$\dot{m}_{pa}$ , kg producto seco/h m <sup>2</sup>		Variación Porcentual Relativa, %
	Experimental	Simulada	
0,20	1,13	1,14	0,77
0,30	1,45	1,34	9,48
0,40	2,49	2,10	15,74
0,50	3,35	3,17	22,71

**Tabla 83.** Velocidad de producción experimental y simulada:  $b=0,20$  mm;  
 $P_v=60$  psig; Variable= $V_{rc}$

Vrc, rpm	$m_{pa}$ , kg producto seco/h $m^2$		Variación Porcentual Relativa, %
	Experimental	Simulada	
$5 \pm 0,5$	0,90	0,97	7,43
$6 \pm 0,5$	1,13	1,14	0,77
$7 \pm 0,5$	1,54	1,49	6,94

### 3.1.10 Dimensiones obtenidas de empresas comerciales

**Tabla 84.** Área de los tambores del secador obtenidas de empresas comerciales

D m	L m	A $m^2$	kg agua/h		Relación L/D
			100 psig	160 psig	
0,152	0,203	0,20	10,00	12,70	1,33
0,305	0,457	0,87	45,50	57,30	1,50
0,610	0,610	2,32	121,40	152,30	1,00
0,610	1,219	4,65	243,20	304,50	2,00
0,813	1,321	6,78	350,90	440,00	1,62
0,813	1,829	9,38	485,90	609,50	2,25
0,813	2,286	11,71	607,30	761,80	2,81
0,813	2,540	13,01	675,00	846,40	3,13
1,067	2,286	15,33	797,30	999,50	2,14
1,067	2,540	17,00	885,90	1110,90	2,40
1,067	3,048	20,44	1063,20	1333,20	2,86
1,524	3,658	35,02	1822,30	2285,00	2,40

### 3.2 Coeficientes de transferencia de calor para las diferentes condiciones de operación

**Tabla 85.** Valores de hw obtenidos para las condiciones de operación experimentales

Variable	psig	$\text{kJ/m}^2 \text{ h } ^\circ\text{C}$
<b>Pv</b>	20	24 027,00
	30	24 334,96
	40	24 525,54
	50	24 681,60
	60	24 811,12
<b>b</b>	<b>mm</b>	<b><math>\text{kJ/m}^2 \text{ h } ^\circ\text{C}</math></b>
	0,20	24 811,12
	0,30	24 811,12
	0,40	24 811,12
	0,50	24 811,12
<b>Vrc</b>	<b>rpm</b>	<b><math>\text{kJ/m}^2 \text{ h } ^\circ\text{C}</math></b>
	5	24 811,12
	6	24 811,12
	7	24 811,12
<b>Promedio</b>	<b><math>\text{kJ/m}^2 \text{ h } ^\circ\text{C}</math></b>	<b>24 682,25</b>
<b>Intervalo de confianza</b>	<b><math>\text{kJ/m}^2 \text{ h } ^\circ\text{C}</math></b>	<b>216,98</b>

**Tabla 86.** Valores de h obtenidos para las condiciones de operación experimentales

Variable	psig	$\text{kJ/m}^2 \text{ h } ^\circ\text{C}$
<b>Pv</b>	20	21,32
	30	21,66
	40	21,71
	50	21,81
	60	21,93
<b>b</b>	<b>mm</b>	<b><math>\text{kJ/m}^2 \text{ h } ^\circ\text{C}</math></b>
	0,2	20,92
	0,3	20,96

**Tabla 86.** Valores de h obtenidos, **Continuación**

<b>Variable</b>	<b>mm</b>	<b>kJ/m<sup>2</sup> h °C</b>
<b>b</b>	0,4	22,18
	0,5	22,20
	0,6	22,19
<b>Vrc</b>	<b>rpm</b>	<b>kJ/m<sup>2</sup> h °C</b>
	5	21,81
	6	21,93
	7	22,14
<b>Promedio</b>	<b>kJ/m<sup>2</sup> h °C</b>	<b>21,75</b>
<b>Intervalo de confianza</b>	<b>kJ/m<sup>2</sup> h °C</b>	<b>0,39</b>

**Tabla 87.** Valores de hp obtenidos para las condiciones de operación experimentales

<b>Variable</b>	<b>psig</b>	<b>kJ/m<sup>2</sup> h °C</b>
<b>Pv</b>	20	979,37
	30	804,67
	40	560,43
	50	464,80
	60	397,66
<b>b</b>	<b>mm</b>	<b>kJ/m<sup>2</sup> h °C</b>
	0,20	397,71
	0,30	452,95
	0,40	746,88
	0,50	879,33
<b>Vrc</b>	<b>rpm</b>	<b>kJ/m<sup>2</sup> h °C</b>
	5	311,53
	6	397,71
	7	565,27

### 3.3 Velocidad del aire calculados

**Tabla 88.** Velocidad del aire para las condiciones de operación experimentales

<b>Variable</b>	<b>psig</b>	<b>m/s</b>
<b>Pv</b>	20	0,018
	30	0,018
	40	0,016
	50	0,015
	60	0,014
<b>b</b>	<b>mm</b>	<b>m/s</b>
	0,20	0,014
	0,30	0,014
	0,40	0,016
	0,50	0,017
<b>Vrc</b>	<b>rpm</b>	<b>m/s</b>
	5	0,013
	6	0,014
	7	0,015
<b>Promedio</b>	<b>m/s</b>	<b>0,015</b>
<b>Intervalo de confianza</b>	<b>m/s</b>	<b>0,002</b>

### 3.4 Número de revoluciones

**Tabla 89.** Número de revoluciones para las condiciones de operación experimentales

<b>Variable</b>	<b>psig</b>	<b>rev</b>
<b>Pv</b>	20	26,46
	30	25,98
	40	26,16
	50	26,16
	60	26,16
<b>b</b>	<b>mm</b>	<b>rev</b>
	0,20	26,16

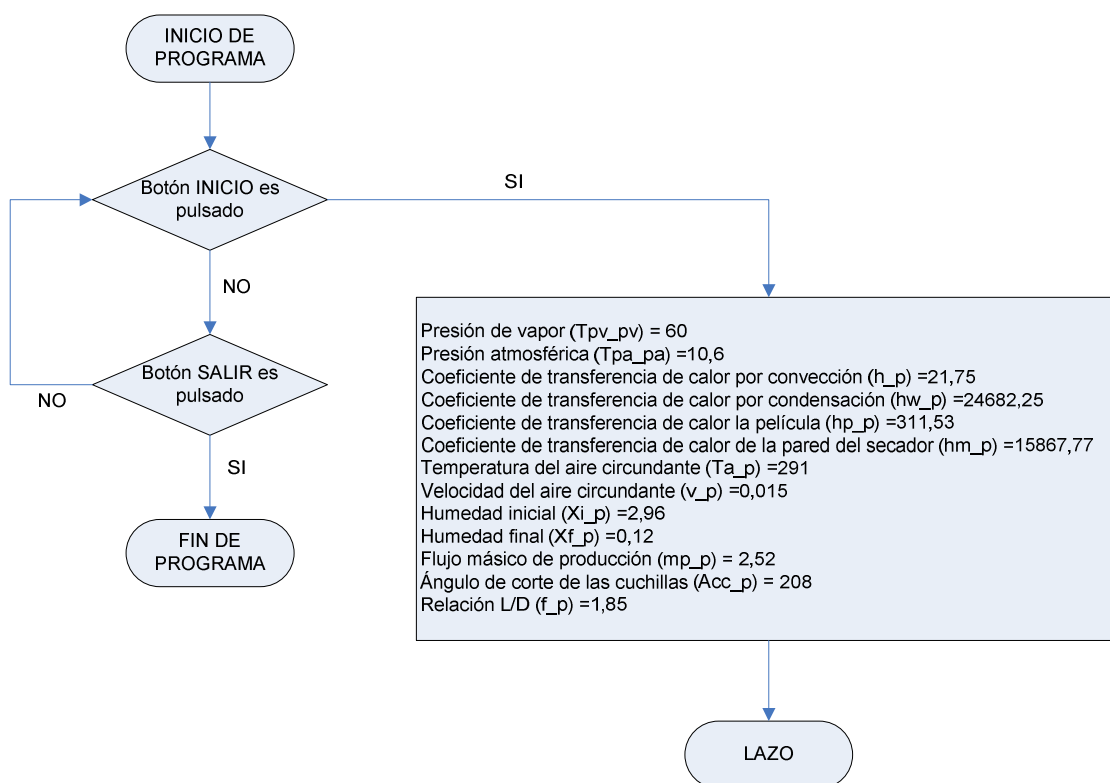
**Tabla 89.** Número de revoluciones, **Continuación**

<b>Variable</b>	<b>mm</b>	<b>rev</b>
<b>b</b>	0,30	24,84
	0,40	21,06
	0,50	18,90
<b>Vrc</b>	<b>rpm</b>	<b>rev</b>
	5	25,85
	6	26,16
	7	26,18
<b>Promedio</b>	<b>rev</b>	<b>24,52</b>
<b>Intervalo de confianza</b>	<b>rev</b>	<b>2,56</b>

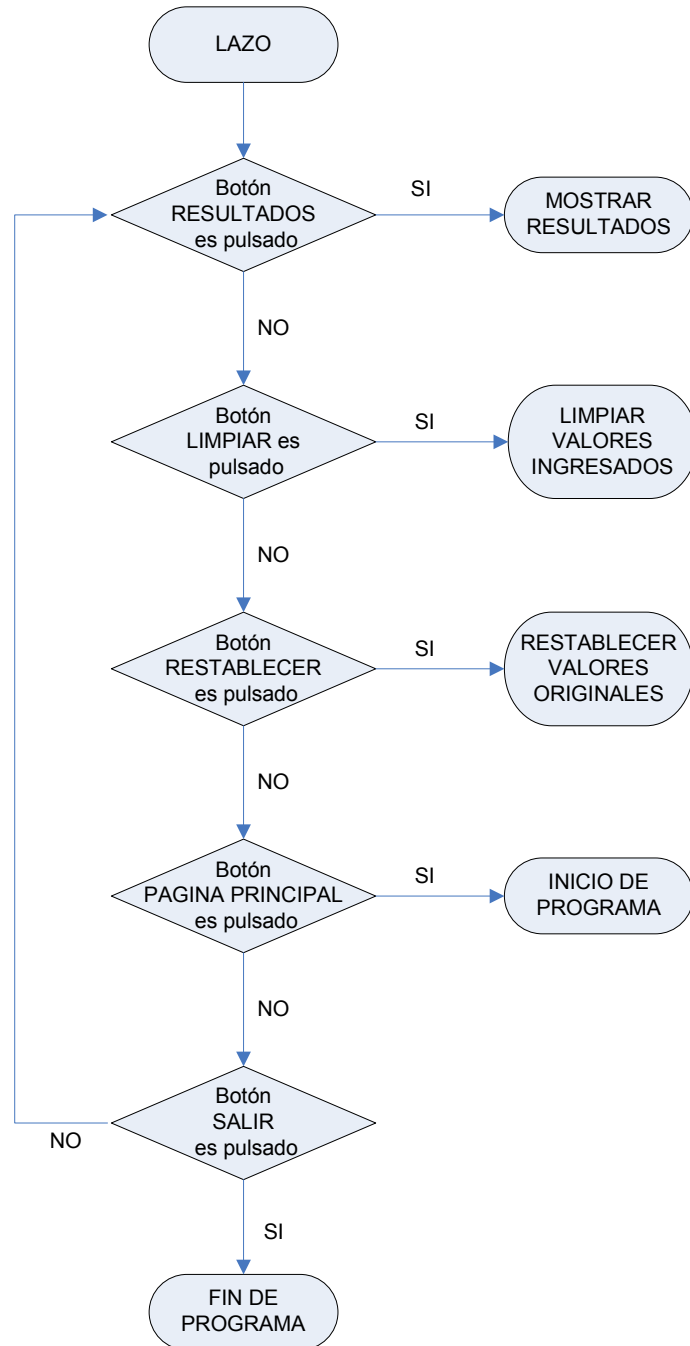
## ANEXO IV

## DIAGRAMAS DE LA PROGRAMACIÓN

A continuación se presentan los diagramas que enlazan las subrutinas del programa SETA I:

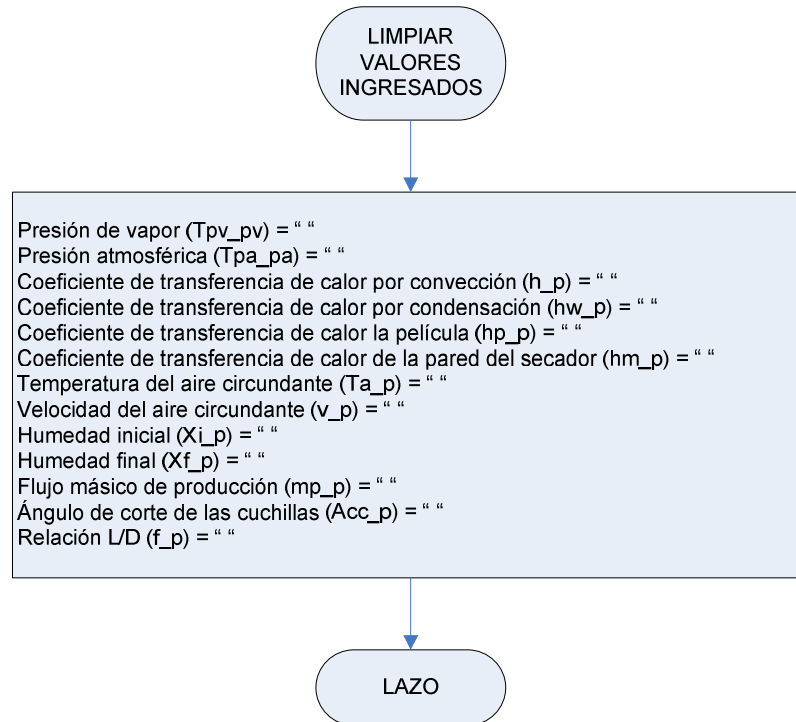


**Figura 49.** Programación de la pantalla principal (SETA I)

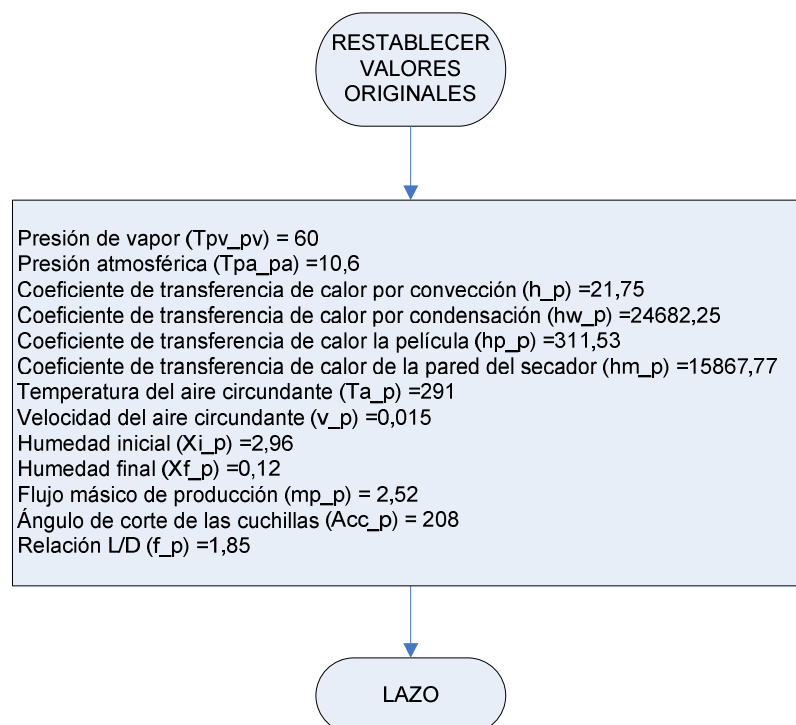


**Figura 50.** Lazo de la programación (pantalla principal y segunda pantalla, SETA I)

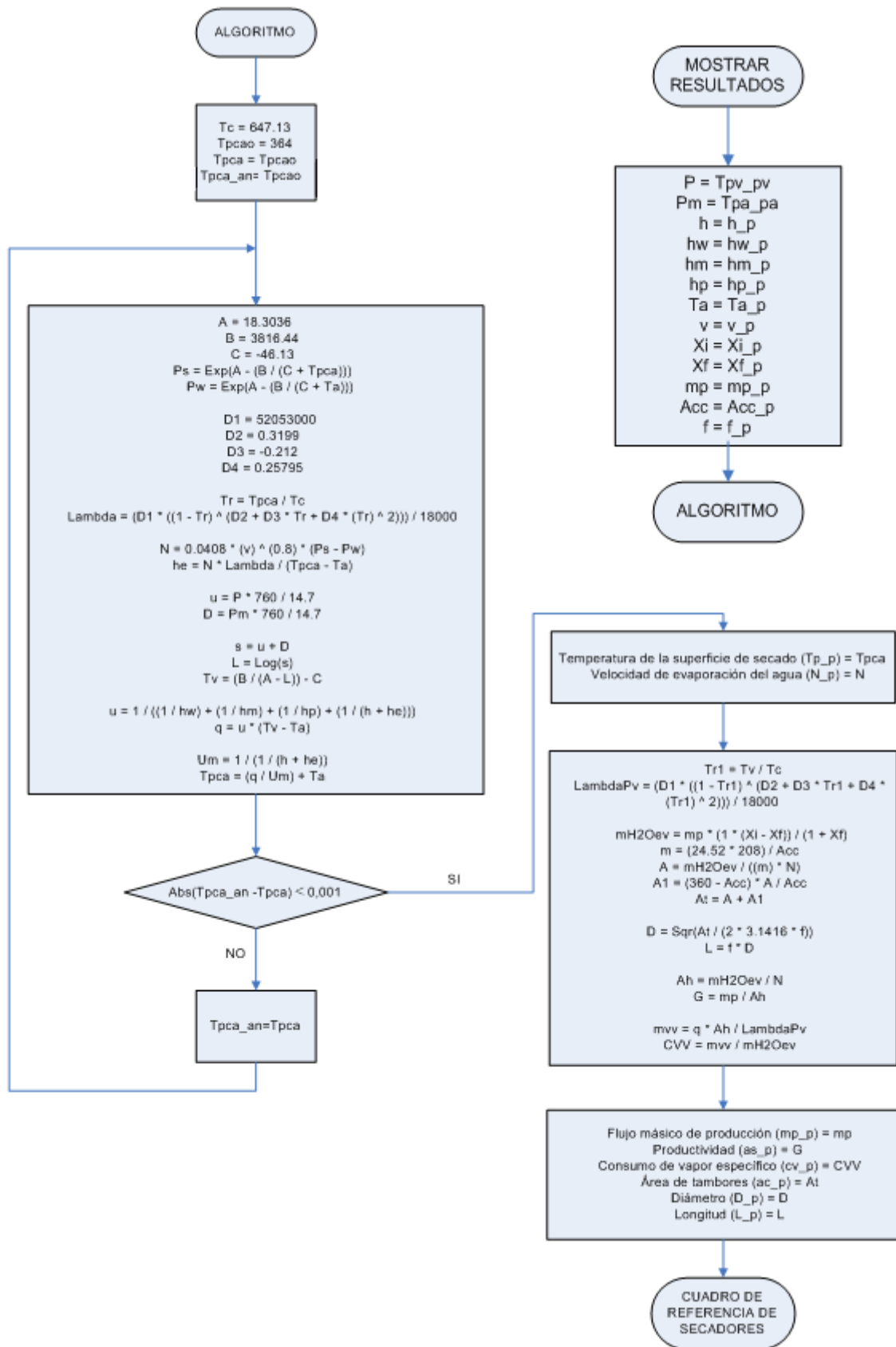




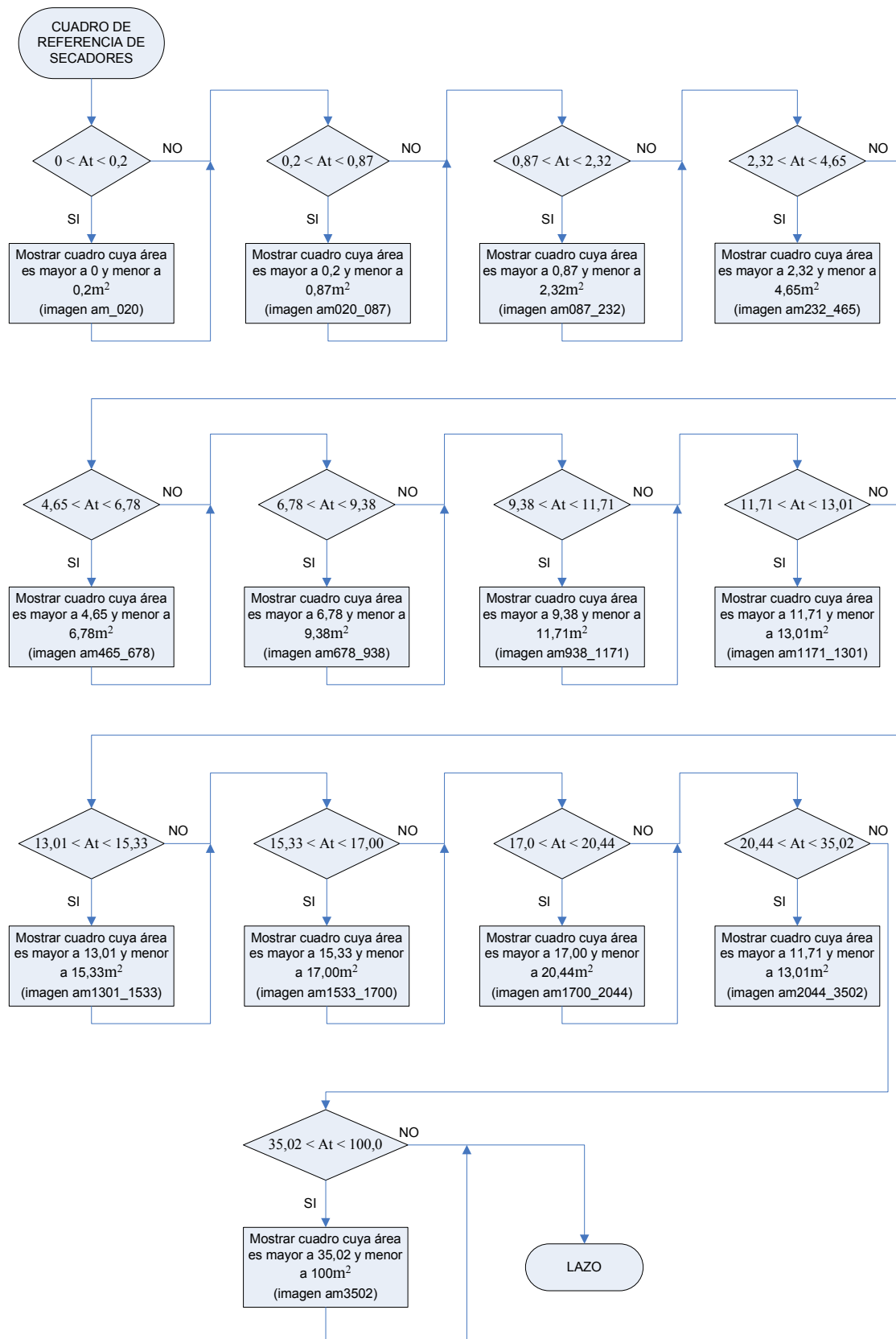
**Figura 51.** Subrutina del Botón “Limpiar” (SETA I)



**Figura 52.** Subrutina del Botón “Restablecer” (SETA I)

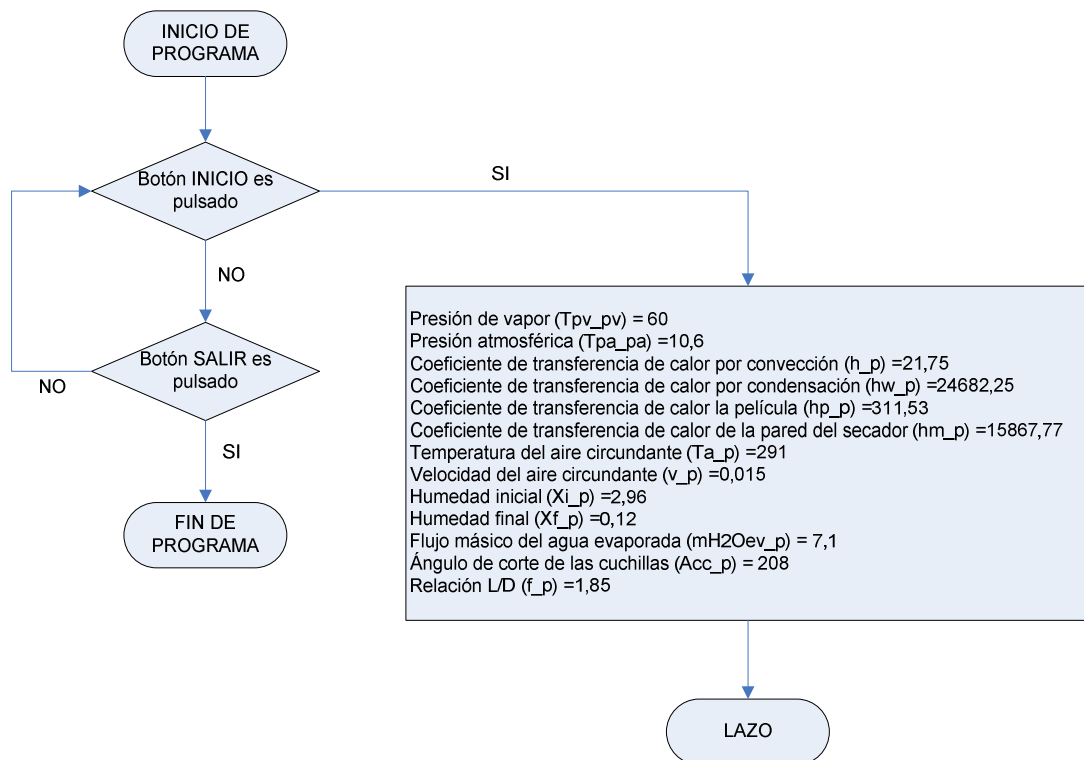


**Figura 53.** Subrutina del Botón “Resultados” y subrutina de los algoritmos (SETA I)

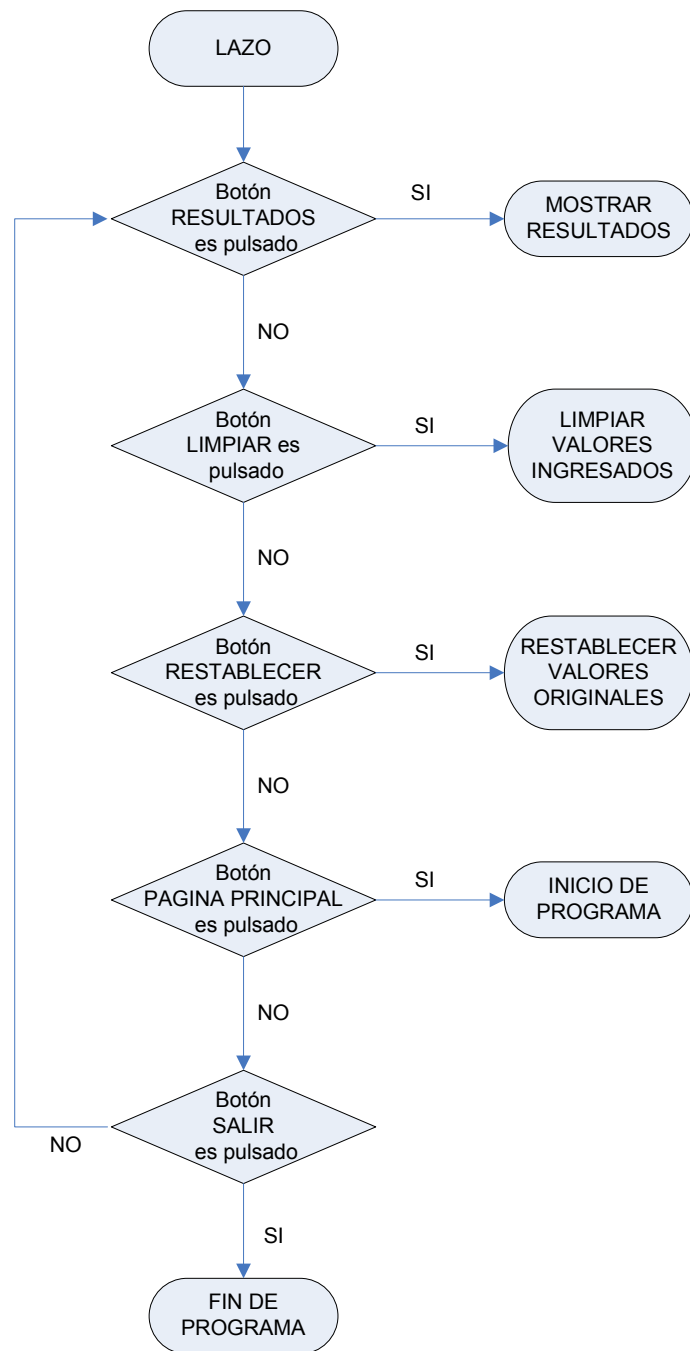


**Figura 54.** Subrutina del cuadro de referencia de secadores comerciales (SETA I)

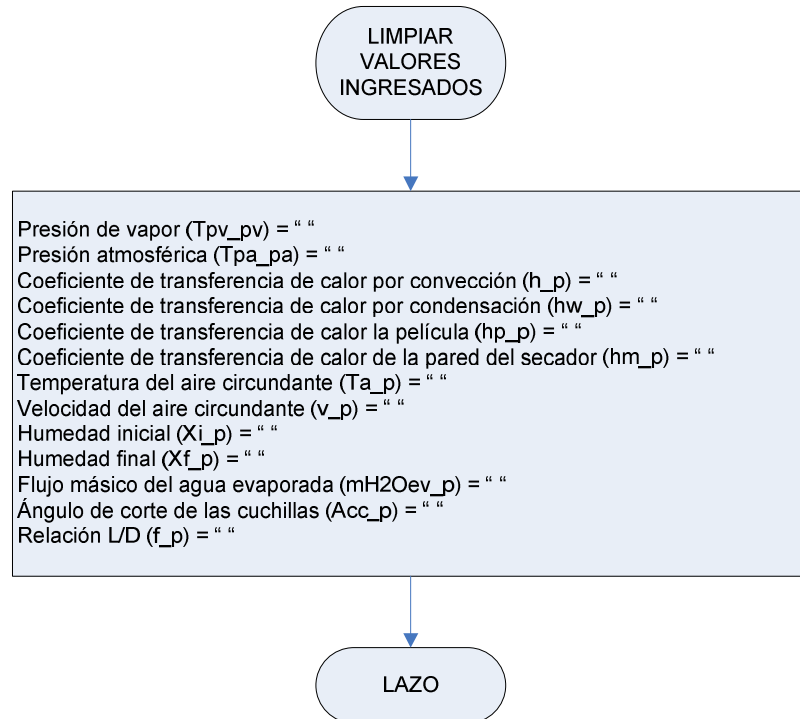
A continuación se presentan los diagramas que enlazan las subrutinas del programa SETA II:



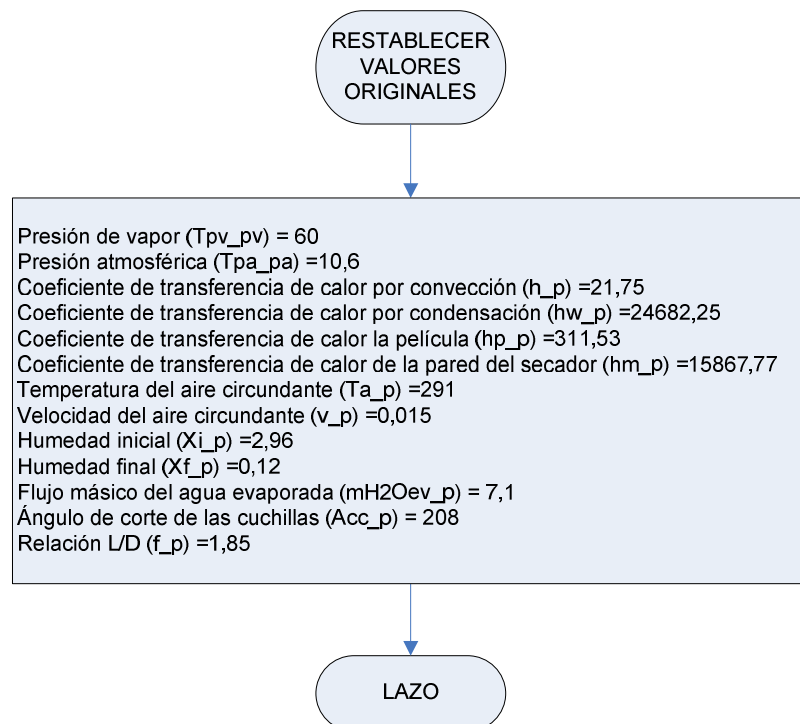
**Figura 55.** Programación de la pantalla principal (SETA II)



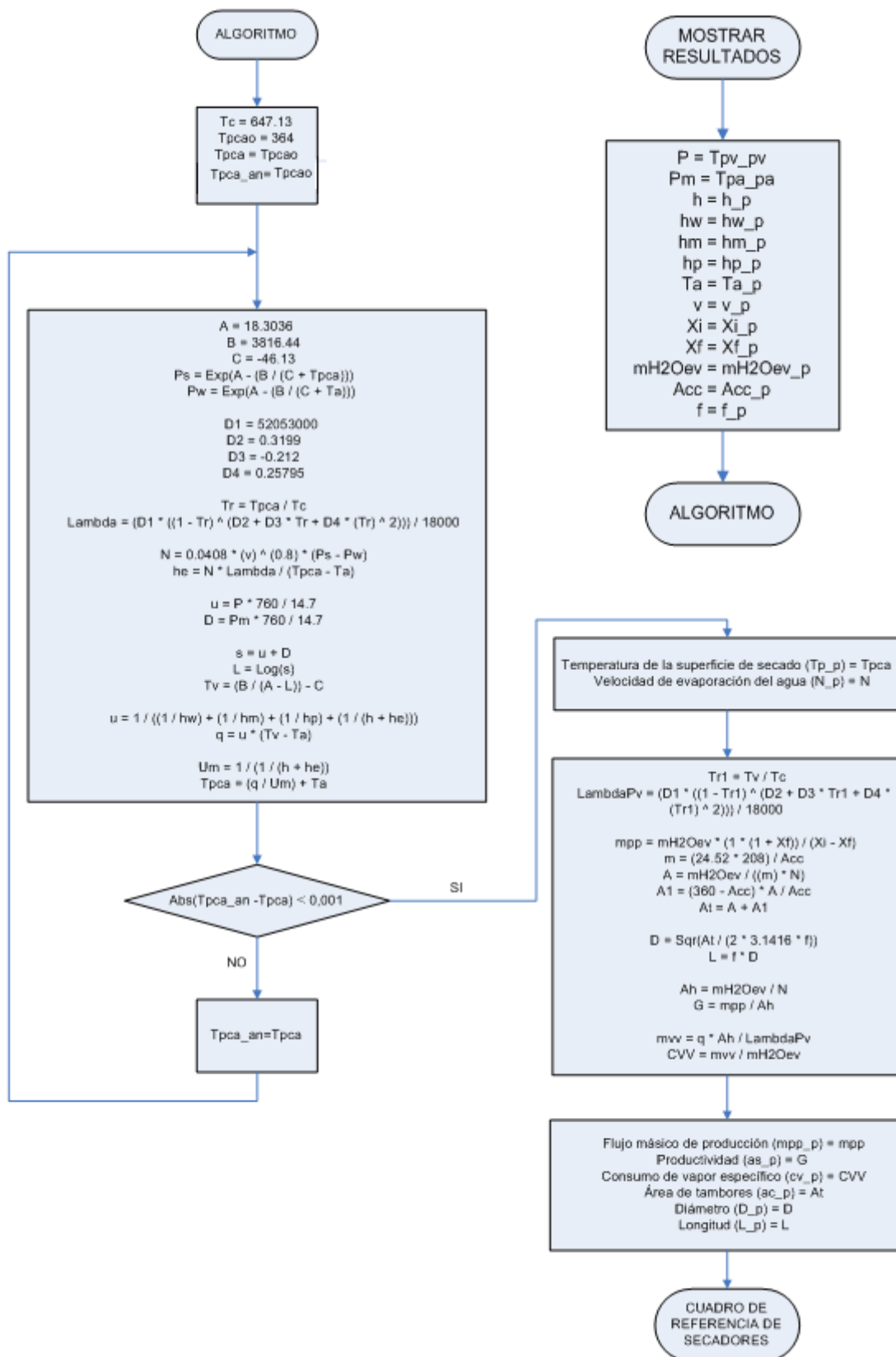
**Figura 56.** Lazo de la programación (Pantalla principal y Segunda pantalla, SETA II)



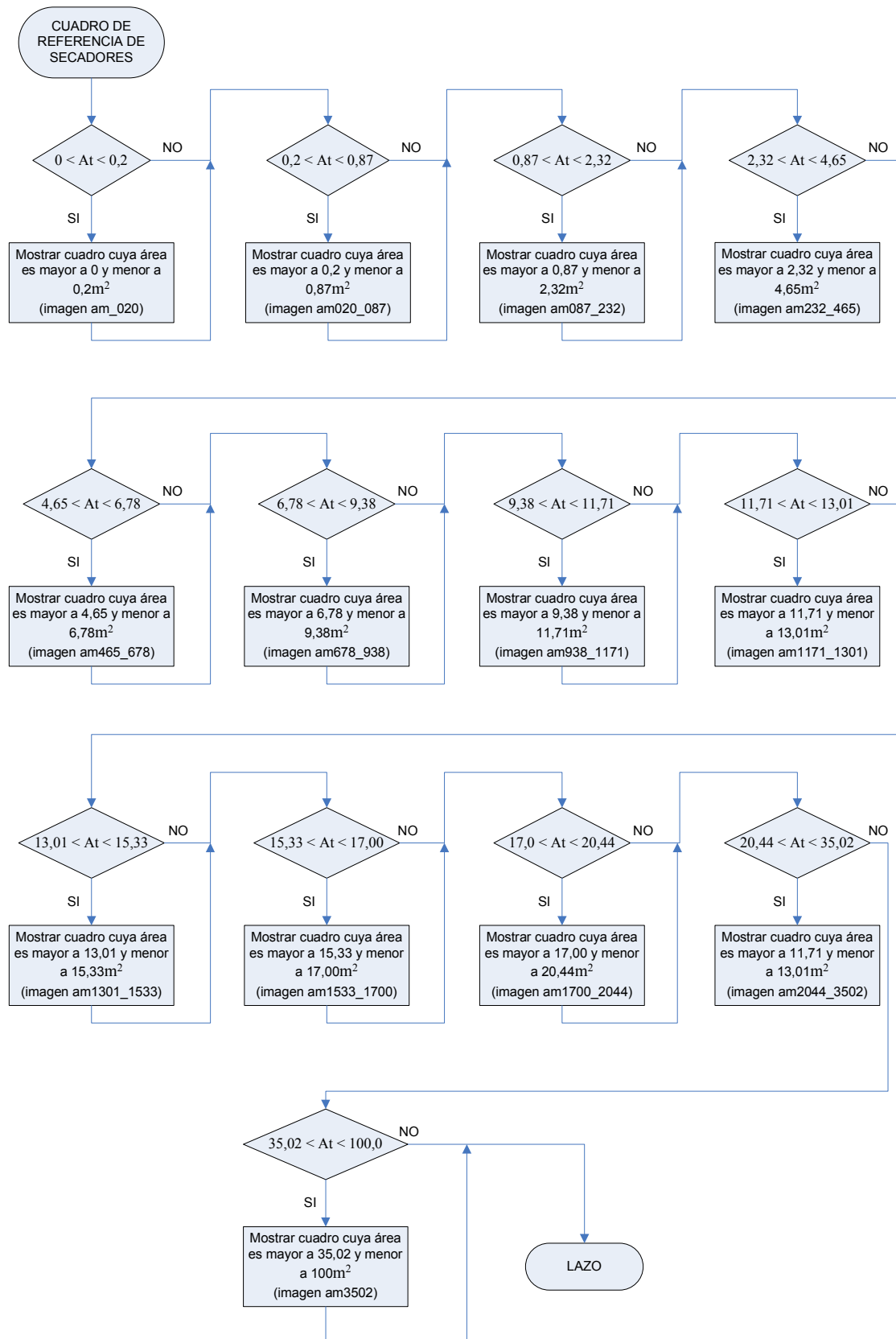
**Figura 57.** Subrutina del Botón “Limpiar” (SETA II)



**Figura 58.** Subrutina del Botón “Restablecer” (SETA II)



**Figura 59.** Subrutina del Botón “Resultados” y subrutina de los algoritmos (SETA II)



**Figura 60.** Subrutina del cuadro de referencia de secadores comerciales (SETA II)



## ANEXO V

### MANUAL DEL USUARIO

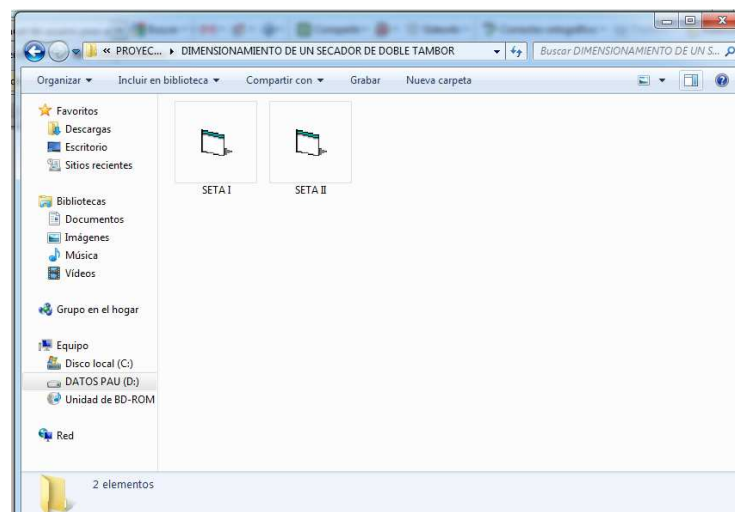
Los programas SETA I y SETA II sirven para estimar las dimensiones de un secador atmosférico de doble tambor continuo cuando se ingresa el flujo másico del agua evaporada, o el flujo másico de producción del material que se desea deshidratar.

### REQUERIMIENTOS

Los programas pueden ejecutarse en un ambiente que soporte Windows Xp o versiones superiores.

### INSTALACIÓN

SETA I y SETA II **NO** tienen programas de instalación, solo es necesario copiar los ejecutables al directorio que el usuario requiera.




## MANEJO DE LOS PROGRAMAS

El manejo de los programas es el mismo, a continuación se presenta el uso de SETA I.

### SETA I



La ejecución se inicia al dar doble clic en el ícono , consecuentemente se mostrará la pantalla principal.



“**Inicio**”: despliega la segunda pantalla para la introducción de parámetros de entrada

“**Salir**”: Cierra el programa

### Introducción de datos

Al pulsar el botón “Inicio” aparece la segunda pantalla, que sirve para la introducción de los parámetros de entrada, necesarios para el dimensionamiento, como se muestra a continuación.

En la pantalla van a aparecer por default los parámetros de entrada que se obtuvieron en la deshidratación de la pasta de banano utilizada en la experimentación como una referencia para el usuario, los mismos que puede cambiar de acuerdo a sus requerimientos.

### “Parámetros de entrada”

Dimensionamiento de un Secador de Doble Tambor

Deshidratación de Productos Alimenticios

**PARÁMETROS DE ENTRADA**

Presión del Vapor	60	psig
Presión Atmosférica	10,6	kgf/kg
Coefficiente de transferencia de Calor por Convección	21,75	kJ/h m <sup>2</sup> °K
Coefficiente de transferencia de Calor por Condensación	24682,25	kJ/h m <sup>2</sup> °K
Coefficiente de transferencia de Calor de la Película	311,53	kJ/h m <sup>2</sup> °K
Coefficiente de transferencia de Calor de la Pared del Secador	15867,77	kJ/h m <sup>2</sup> °K
Temperatura del Aire Circundante	291	°K
Velocidad del Aire Circundante	0,015	m/s
Humedad Inicial (BS)	2,96	kg H <sub>2</sub> O/kg Sólido Seco
Humedad Final (BS)	0,12	kg H <sub>2</sub> O/kg Sólido Seco
Flujo Másico de Producción	2,52	kg producto seco/h
Ángulo de corte de las cuchillas	208	°
Relación L/D	1,85	

**RESULTADOS**

Temperatura de la Superficie de Secado		° K
Velocidad de evaporación del agua		kg H <sub>2</sub> O/h m <sup>2</sup>
Agua Evaporada		kg H <sub>2</sub> O/h
Consumo de Vapor Especifico		kg vapor/kg H <sub>2</sub> O evaporada
Productividad		kg producto seco/h m <sup>2</sup>
Área de los Tambores		m <sup>2</sup>

**DIMENSIONES**

Diámetro		m	Longitud		m
----------	--	---	----------	--	---

Restablecer    Limpiar

Página Principal    Resultados    Salir

“**Restablecer**”: Devuelve los parámetros de entrada establecidos por default por el programa

“**Limpiar**”: Borra los parámetros de entrada y los resultados desplegados

“**Página Principal**”: Regresa a la página principal

“**Resultados**”: Despliega los resultados

“**Salir**”: Cierra el programa

## RESULTADOS Y AJUSTES

Los resultados se van a desplegar al lado derecho de la segunda pantalla al pulsar el botón “Resultados”.

Dimensionamiento de un Secador de Doble Tambor

### Deshidratación de Productos Alimenticios

#### PARÁMETROS DE ENTRADA

Presión del Vapor  psig

Presión Atmosférica  kJ/kg

Coefficiente de transferencia de Calor por Convección  kJ/h m<sup>2</sup> °K

Coefficiente de transferencia de Calor por Condensación  kJ/h m<sup>2</sup> °K

Coefficiente de transferencia de Calor de la Película  kJ/h m<sup>2</sup> °K

Coefficiente de transferencia de Calor de la Pared del Secador  kJ/h m<sup>2</sup> °K

Temperatura del Aire Circundante  °K

Velocidad del Aire Circundante  m/s

Humedad Inicial (BS)  kg H<sub>2</sub>O/kg Sólido Seco

Humedad Final (BS)  kg H<sub>2</sub>O/kg Sólido Seco

Flujo Másico de Producción  kg producto seco/h

Ángulo de corte de las cuchillas  ° Relación L/D

#### RESULTADOS

Temperatura de la Superficie de Secado  ° K

Velocidad de evaporación del agua  kg H<sub>2</sub>O/h m<sup>2</sup>

Agua Evaporada  kg H<sub>2</sub>O/h

Consumo de Vapor Especifico  kg vapor/kg H<sub>2</sub>O evaporada

Productividad  kg producto seco/h m<sup>2</sup>

Área de los Tambores  m<sup>2</sup>

#### DIMENSIONES

Diámetro  m Longitud  m

#### REFERENCIAS DE SECADORES FABRICADOS COMERCIALMENTE

Valor aproximado	D [m]	L [m]	A [m <sup>2</sup> ]
FUERA DEL LÍMITE O RANGO INFERIOR			
Superior	0,152	0,203	0,20

“**Restablecer**”: Devuelve los parámetros de entrada establecidos por default por el programa

“**Limpiar**”: Borra los parámetros de entrada y los resultados desplegados

“**Salir**”: Cierra el programa

“**Referencias de secadores fabricados comercialmente**”: proporciona dimensiones de secadores comerciales como referencia para el usuario

Los resultados generados son: (1) Temperatura de la superficie de secado; (2) Velocidad de secado; (3) Flujo másico del agua evaporada; (4) Consumo de vapor específico; y (5) Área de los tambores del secador, la longitud y diámetro del secador; También, se despliegan dimensiones de secadores fabricados comercialmente como referencia.

El botón “Limpiar” borra los parámetros de entrada y los resultados para facilidad del usuario, de tal manera que se debe ingresar todos los parámetros.

Dimensionamiento de un Secador de Doble Tambor

### Deshidratación de Productos Alimenticios

**PARÁMETROS DE ENTRADA**

Presión del Vapor  psig

Presión Atmosférica  kg

Coefficiente de transferencia de Calor por Convección   $\text{kJ/h m}^2 \text{ }^\circ\text{K}$

Coefficiente de transferencia de Calor por Condensación   $\text{kJ/h m}^2 \text{ }^\circ\text{K}$

Coefficiente de transferencia de Calor de la Película   $\text{kJ/h m}^2 \text{ }^\circ\text{K}$

Coefficiente de transferencia de Calor de la Pared del Secador   $\text{kJ/h m}^2 \text{ }^\circ\text{K}$

Temperatura del Aire Circundante   $^\circ\text{K}$

Velocidad del Aire Circundante  m/s

Humedad Inicial (BS)   $\text{kg H}_2\text{O/kg Sólido Seco}$

Humedad Final (BS)   $\text{kg H}_2\text{O/kg Sólido Seco}$

Flujo Másico de Producción   $\text{kg producto seco/h}$

Ángulo de corte de las cuchillas   $^\circ$  Relación L/D

**RESULTADOS**

Temperatura de la Superficie de Secado   $^\circ\text{K}$

Velocidad de evaporación del agua   $\text{kg H}_2\text{O/h m}^2$

Agua Evaporada   $\text{kg H}_2\text{O/h}$

Consumo de Vapor Específico   $\text{kg vapor/kg H}_2\text{O evaporada}$

Productividad   $\text{kg producto seco/h m}^2$

Área de los Tambores   $\text{m}^2$

**DIMENSIONES**

Diámetro  m Longitud  m

Restablecer Limpiar

Página Principal Resultados Salir

**“Restablecer”**: Devuelve los parámetros de entrada establecidos por default por el programa

**“Salir”**: Cierra el programa

**“Resultados”**: Despliega los resultados

Por otro lado, se puede restituir los parámetros iniciales al dar un clic en el botón “Restablecer” como se puede ver en la figura.

Dimensionamiento de un Secador de Doble Tambor

### Deshidratación de Productos Alimenticios

PARÁMETROS DE ENTRADA			
Presión del Vapor	<input type="text" value="60"/>	psig	
Presión Atmosférica	<input type="text" value="10,6"/>	kJ/kg	
Coefficiente de transferencia de Calor por Convección	<input type="text" value="21,75"/>	kJ/h m <sup>2</sup> °K	
Coefficiente de transferencia de Calor por Condensación	<input type="text" value="24682,25"/>	kJ/h m <sup>2</sup> °K	
Coefficiente de transferencia de Calor de la Película	<input type="text" value="311,53"/>	kJ/h m <sup>2</sup> °K	
Coefficiente de transferencia de Calor de la Pared del Secador	<input type="text" value="15867,77"/>	kJ/h m <sup>2</sup> °K	
Temperatura del Aire Circundante	<input type="text" value="291"/>	°K	
Velocidad del Aire Circundante	<input type="text" value="0,015"/>	m/s	
Humedad Inicial (BS)	<input type="text" value="2,96"/>	kg H <sub>2</sub> O/kg Sólido Seco	
Humedad Final (BS)	<input type="text" value="0,12"/>	kg H <sub>2</sub> O/kg Sólido Seco	
Flujo Másico de Producción	<input type="text" value="2,52"/>	kg producto seco/h	
Ángulo de corte de las cuchillas	<input type="text" value="208"/>	°	Relación L/D <input type="text" value="1,85"/>

RESULTADOS		
Temperatura de la Superficie de Secado	<input type="text"/>	°K
Velocidad de evaporación del agua	<input type="text"/>	kg H <sub>2</sub> O/h m <sup>2</sup>
Agua Evaporada	<input type="text"/>	kg H <sub>2</sub> O/h
Consumo de Vapor Específico	<input type="text"/>	kg vapor/kg H <sub>2</sub> O evaporada
Productividad	<input type="text"/>	kg producto seco/h m <sup>2</sup>
Área de los Tambores	<input type="text"/>	m <sup>2</sup>

DIMENSIONES			
Diámetro	<input type="text"/>	m	Longitud <input type="text"/>
			m

**“Restablecer”**: Devuelve los parámetros de entrada establecidos por default por el programa

**“Limpiar”**: Borra los parámetros de entrada y los resultados desplegados

**“Página Principal”**: Regresa a la página principal

**“Resultados”**: Despliega los resultados

**“Salir”**: Cierra el programa

### -Ejemplo de Aplicación

La pantalla de introducción de datos de los programas consideran como parámetros de entrada a: (1) Presión del vapor; (2) Presión atmosférica; (3) Coeficiente de transferencia de calor por convección; (4) Coeficiente de transferencia de calor por condensación; (5) Coeficiente de transferencia de calor de la película; (6) Coeficiente de transferencia de calor de la pared del secador; (7) Temperatura del aire circundante; (8) Velocidad del aire; (9) Humedad inicial; (10) Humedad final; y (11) El flujo másico de producción, en el caso de SETA I; o el flujo másico del agua evaporada, en el caso de SETA II.


A continuación se presenta un ejemplo de aplicación para SETA II.

### SETA II

Se requiere encontrar las dimensiones, el flujo y velocidad del agua evaporada; y también, el consumo de vapor específico de un secador de doble tambor, para lo cual, se disponen de los datos que se encuentran en la tabla 90.

**Tabla 90.** Parámetros para el dimensionamiento SETA II

Parámetros de la Simulación	Símbolo	Valor	Unidad
Presión del vapor	Pv	160	psig
Presión Atmosférica	Pa	10,6	psig
Coeficiente de TQ debido a la Convección	h	21,75	kJ/m <sup>2</sup> h°C
Coeficiente de TQ por Condensación	hw	24682,25	kJ/m <sup>2</sup> h°C
Coeficiente de TQ de la pared del tambor	hm	15867,77	kJ/m <sup>2</sup> h°C
Coeficiente de TQ de la lámina	hp	381,29	kJ/m <sup>2</sup> h°C
Temperatura del aire circundante	Ta	291	°K
Velocidad del aire circundante	v	0,015	m/s
Humedad inicial	Xi	2,96	kg H <sub>2</sub> O/kg sólido seco
Humedad final	Xf	0,16	kg H <sub>2</sub> O/kg sólido seco
Agua evaporada	mH <sub>2</sub> Oe	2285,00	Kg H <sub>2</sub> O/h
Ángulo de Corte	q	208	°
Relación L/D	f	2,40	

Se ejecuta el programa al hacer doble clic en  y se presentará la pantalla principal



“**Inicio**”: despliega la segunda pantalla para la introducción de parámetros de entrada

“**Salir**”: Cierra el programa

### Introducción de datos

La segunda pantalla se muestra al pulsar el botón “Inicio” como se muestra a continuación:



## “Parámetros de entrada”

Dimensionamiento de un Secador de Doble Tambor

Deshidratación de Productos Alimenticios

**PARÁMETROS DE ENTRADA**

Presión del Vapor	<input type="text" value="60"/>	psig
Presión Atmosférica	<input type="text" value="10,6"/>	kgf/kg
Coefficiente de transferencia de Calor por Convección	<input type="text" value="21,75"/>	kJ/h m <sup>2</sup> °K
Coefficiente de transferencia de Calor por Condensación	<input type="text" value="24682,25"/>	kJ/h m <sup>2</sup> °K
Coefficiente de transferencia de Calor de la Película	<input type="text" value="311,53"/>	kJ/h m <sup>2</sup> °K
Coefficiente de transferencia de Calor de la Pared del Secador	<input type="text" value="15867,77"/>	kJ/h m <sup>2</sup> °K
Temperatura del Aire Circundante	<input type="text" value="291"/>	°K
Velocidad del Aire Circundante	<input type="text" value="0,015"/>	m/s
Humedad Inicial (BS)	<input type="text" value="2,96"/>	kg H <sub>2</sub> O/kg Sólido Seco
Humedad Final (BS)	<input type="text" value="0,12"/>	kg H <sub>2</sub> O/kg Sólido Seco
Flujo Másico del Agua Evaporada	<input type="text" value="7,1"/>	kg H <sub>2</sub> O/h
Ángulo de corte de las cuchillas	<input type="text" value="208"/>	°
Relación L/D	<input type="text" value="1,85"/>	

**RESULTADOS**

Temperatura de la Superficie de Secado	<input type="text"/>	° K
Velocidad de evaporación del agua	<input type="text"/>	kg H <sub>2</sub> O/h m <sup>2</sup>
Flujo másico de producción	<input type="text"/>	kg producto seco/h
Consumo de Vapor Especifico	<input type="text"/>	kg vapor/kg H <sub>2</sub> O evaporada
Productividad	<input type="text"/>	kg producto seco/h m <sup>2</sup>
Área de los Tambores	<input type="text"/>	m <sup>2</sup>

**DIMENSIONES**

Diámetro  m      Longitud  m

Restablecer
Limpiar

Página Principal
Resultados
Salir

“**Restablecer**” : Devuelve los parámetros de entrada establecidos por default por el programa

“**Limpiar**” : Borra los parámetros de entrada y los resultados desplegados

“**Página Principal**” : Regresa a la página principal

“**Resultados**” : Despliega los resultados

“**Salir**” : Cierra el programa

En la pantalla van a aparecer por default los parámetros de entrada que se obtuvieron en la deshidratación de la pasta de banano utilizada en la

experimentación como una referencia para el usuario, los mismos que puede cambiar de acuerdo a sus requerimientos.

El botón “Limpiar” borra los parámetros de entrada que aparecen en la pantalla por default. En la siguiente figura se muestra como queda la pantalla después de pulsar el botón limpiar, y se puede proceder a ingresar todos los parámetros para el dimensionamiento.

“Ingresar los parámetros de entrada de la tabla 90”

“Restablecer”: Devuelve los parámetros de entrada establecidos por default por el programa

“Salir”: Cierra el programa

“Resultados”: Despliega los resultados

La siguiente figura presenta la pantalla después de haber ingresado los datos:

“Datos ingresados por el usuario”

Dimensionamiento de un Secador de Doble Tambor

### Deshidratación de Productos Alimenticios

**PARÁMETROS DE ENTRADA**

Presión del Vapor	<input type="text" value="160"/>	psig
Presión Atmosférica	<input type="text" value="10,6"/>	kgf/cm <sup>2</sup>
Coefficiente de transferencia de Calor por Convección	<input type="text" value="21,75"/>	kJ/h m <sup>2</sup> °K
Coefficiente de transferencia de Calor por Condensación	<input type="text" value="24682,25"/>	kJ/h m <sup>2</sup> °K
Coefficiente de transferencia de Calor de la Película	<input type="text" value="381,29"/>	kJ/h m <sup>2</sup> °K
Coefficiente de transferencia de Calor de la Pared del Secador	<input type="text" value="15867,77"/>	kJ/h m <sup>2</sup> °K
Temperatura del Aire Circundante	<input type="text" value="291"/>	°K
Velocidad del Aire Circundante	<input type="text" value="0,015"/>	m/s
Humedad Inicial (BS)	<input type="text" value="2,96"/>	kg H <sub>2</sub> O/kg Sólido Seco
Humedad Final (BS)	<input type="text" value="0,16"/>	kg H <sub>2</sub> O/kg Sólido Seco
Flujo Másico del Agua Evaporada	<input type="text" value="2285"/>	kg H <sub>2</sub> O/h
Ángulo de corte de las cuchillas	<input type="text" value="208"/>	°
Relación L/D	<input type="text" value="2,40"/>	

**RESULTADOS**

Temperatura de la Superficie de Secado	<input type="text"/>	° K
Velocidad de evaporación del agua	<input type="text"/>	kg H <sub>2</sub> O/h m <sup>2</sup>
Flujo másico de producción	<input type="text"/>	kg producto seco/h
Consumo de Vapor Específico	<input type="text"/>	kg vapor/kg H <sub>2</sub> O evaporada
Productividad	<input type="text"/>	kg producto seco/h m <sup>2</sup>
Área de los Tambores	<input type="text"/>	m <sup>2</sup>

**DIMENSIONES**

Diámetro  m      Longitud  m

Restablecer    Limpiar    Página Principal    Resultados    Salir

“**Restablecer**””: Devuelve los parámetros de entrada establecidos por default por el programa

“**Limpiar**””: Borra los parámetros de entrada y los resultados desplegados

“**Página Principal**””: Regresa a la página principal

“**Resultados**””: Despliega los resultados

“**Salir**””: Cierra el programa

Al pulsar el botón “Resultados” los resultados se van a desplegar al lado derecho de la segunda pantalla

Los resultados generados son: (1) Temperatura de la superficie de secado; (2) Velocidad de secado; (3) Flujo másico del agua evaporada; (4) Consumo de vapor específico; y (5) Área de los tambores del secador, la longitud y diámetro del secador; también, se despliegan dimensiones de secadores fabricados comercialmente como referencia.

Dimensionamiento de un Secador de Doble Tambor

### Deshidratación de Productos Alimenticios

**PARÁMETROS DE ENTRADA**

Presión del Vapor:  psig

Presión Atmosférica:  kJ/kg

Coefficiente de transferencia de Calor por Convección:  kJ/h m<sup>2</sup> °K

Coefficiente de transferencia de Calor por Condensación:  kJ/h m<sup>2</sup> °K

Coefficiente de transferencia de Calor de la Película:  kJ/h m<sup>2</sup> °K

Coefficiente de transferencia de Calor de la Pared del Secador:  kJ/h m<sup>2</sup> °K

Temperatura del Aire Circundante:  °K

Velocidad del Aire Circundante:  m/s

Humedad Inicial (BS):  kg H<sub>2</sub>O/kg Sólido Seco

Humedad Final (BS):  kg H<sub>2</sub>O/kg Sólido Seco

Flujo Másico del Agua Evaporada:  kg H<sub>2</sub>O/h

Ángulo de corte de las cuchillas:  ° Relación L/D:

**RESULTADOS**

Temperatura de la Superficie de Secado:  ° K

Velocidad de evaporación del agua:  kg H<sub>2</sub>O/h m<sup>2</sup>

Flujo másico de producción:  kg producto seco/h

Consumo de Vapor Específico:  kg vapor/kg H<sub>2</sub>O evaporada

Productividad:  kg producto seco/h m<sup>2</sup>

Área de los Tambores:  m<sup>2</sup>

**DIMENSIONES**

Diámetro:  m Longitud:  m

**REFERENCIA DE SECADORES FABRICADOS COMERCIALMENTE**

Valor aproximado	D [m]	L [m]	A [m <sup>2</sup> ]
Inferior	1,067	3,048	20,44
Superior	1,524	3,658	35,02

“**Restablecer**”: Devuelve los parámetros de entrada establecidos por default por el programa

“**Limpiar**”: Borra los parámetros de entrada y los resultados desplegados

“**Salir**”: Cierra el programa

“**Referencias de secadores fabricados comercialmente**”: proporciona dimensiones de secadores comerciales como referencia para el usuario

