



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA MIXTECA

“CONSTRUCCIÓN DE UN SECADOR POR ASPERSIÓN A ESCALA LABORATORIO Y SU EVALUACIÓN CON JUGO DE JITOMATE (*SOLANUM LYCOPERSICUM*)”

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO EN ALIMENTOS

PRESENTA:

JESÚS OTHAIVI CHECA PERALTA

DIRECTOR DE TESIS:

DR. RAÚL SALAS CORONADO

HUAJUAPAN DE LEÓN, OAXACA, MÉXICO,

FEBRERO DE 2013

La construcción y ensamblado del equipo se realizó en la Universidad Tecnológica de la Mixteca; la parte de acero inoxidable en el taller de manufactura, lo correspondiente al aislante térmico en el taller de cerámica, las piezas de vidrio las fabricó la empresa EVELSA y el ensamblado y la evaluación con jugo de jitomate se realizó en el Laboratorio de Agroindustrias de la misma universidad.

Dedico mi tesis a todas las personas que directa e indirectamente hicieron esto posible.

A Dios.

Por haberme permitido llegar hasta donde me encuentro, por los triunfos y los momentos difíciles que me han enseñado a valorar cada día y por tener esta maravillosa familia.

A mi madre Isabel.

Por su perseverancia y constancia que la caracteriza, me ha servido de ejemplo para culminar un escalón más en mi vida, pero más que nada, por su amor.

A mi padre José Ramón.

Por su apoyo en todo momento, sus consejos y su ejemplo de vida me ha impulsado a salir adelante.

Gracias por todo, papá y mamá, por darme la oportunidad de tener una carrera y creer en mí. Este trabajo que me llevó un año en culminarlo es para ustedes.

A mis hermanos Luis Edgar y José Ramón.

Que me impulsaron a terminar esta tesis.

A mis abuelos.

Por creer en mí y por motivarme siempre para terminar con éxito esta etapa de mi vida.

A mis familiares.

Por brindarme bellos momentos, apoyo incondicional y cariño.

A mis maestros

Por su gran apoyo en mi desarrollo profesional e influir para la culminación de mis estudios; en especial a los doctores Raúl Salas Coronado y Rogelio Valadez Blanco, por ser parte fundamental en la elaboración de esta tesis.

A mis amigos

Quisiera nombrarlos a todos aunque son muchos, sin embargo eso no significa que no los recuerde. Gracias, por apoyarnos mutuamente en nuestra formación profesional. A José Adrián, Andrea, Karla, Magdalena y Admín, por haberme ayudado en la realización de este trabajo.

A la Universidad Tecnología de la Mixteca y en especial al Instituto de Agroindustrias por permitirme ser parte de una generación de triunfadores y gente productiva para este país.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se culminó gracias al apoyo y colaboración de muchas personas.

En primer lugar, agradezco al Ing. Admín Camacho Jiménez y al MDI. Fernando Iturbide Jiménez por haberme ayudado en la elaboración de los planos.

Agradezco también al Ing. Yoshito Hernández Echeverría, por haberme enseñado la técnica de moldear los cerámicos refractarios.

Agradezco al Dr. Raúl Salas Coronado, por haberme orientado y apoyado en el trabajo de construcción, así como en las múltiples revisiones de este trabajo.

Muchas gracias al Dr. Rogelio Valadez Blanco, por colaborar con sus puntos de vista sobre esta tesis.

A mis sinodales, la M.C. Alma Yadira Salazar Govea, al M.C. Ignacio Hernández Castillo y al Dr. Rogelio Valadez Blanco, por haber colaborado en las revisiones para la culminación de este trabajo.

A todos los maestros y amigos que aportaron ideas para la construcción del equipo.

Este trabajo recibió financiamiento parcial por parte del programa FOMIX-CONACYT por medio del proyecto 124242, intitulado “Estudio para determinar el potencial para la elaboración de biofertilizantes con base en micorrizas y Azoospirillum en Oaxaca”, bajo la responsabilidad del Dr. Rogelio Valadez Blanco, y con la finalidad de adquirir la boquilla neumática y las resistencias calefactoras con su controlador.

Este proyecto es una plena plataforma experimental; los daños, reconstrucciones y automatizaciones que experimente lo perfeccionan y afinan para edificarlo como un equipo.

RESUMEN

El secado por aspersión es una operación que consiste en la transformación de un producto líquido a una forma sólida en presentación de polvo. Este fenómeno se logra al generar una nube de gotas pequeñas que poseen una gran superficie de contacto para remover agua. Para la remoción del agua desde las gotas, se hace pasar aire caliente a través de éstas. Este proceso de secado inicia con una atomización del fluido semilíquido, seguido de un intercambio de materia-energía (fluido-aire secante) y finalmente una recuperación de los polvos. En el presente proyecto, la atomización se realizó mediante una boquilla marca *Buchi*, a un flujo de alimentación de 1.5 mL/min, 80 °C y una presión de 2.5 bar. La descarga del atomizado se realizó en una cámara de vidrio de borosilicato de configuración 4:1 (altura : diámetro), donde se efectuó el intercambio de materia-energía con aire secante a un flujo 9000 L/h y 135 °C. Una vez obtenidos los polvos, el mismo aire secante los traslada a un ciclón tangencial para poder separar el aire de los polvos. Los experimentos permitieron obtener una eficiencia de separación del 45 - 65 % con humedades en los polvos del 5 al 7 %. Para poder generar el aire secante, se construyó un sistema de retención de calor, donde una parte importante del calor producido por las resistencias eléctricas se concentró en el aire. Este sistema presentó una eficiencia de aprovechamiento del calor de 60 - 70 %. Por último, los resultados de la evaluación de las propiedades físicas del producto rehidratado mostraron que el deshidratado del jugo de jitomate promueve el incremento del color amarillo, expresado como un aumento del valor b^* (del sistema CIEL^{*}a^{*}b^{*}). Este cambio indica una degradación e isomerización de licopeno durante el deshidratado. También se observó que al aumentar la viscosidad del jugo de jitomate, se incrementó la recuperación de polvos. La viscosidad del jugo se incrementó mediante un aumento en el porcentaje de sus sólidos por adición de maltodextrinas. A partir de la deshidratación de un jugo de jitomate con un 14 % de sólidos, se recuperó el 45 % de los polvos esperados; mientras que a partir de un jugo con 23 % de sólidos, se recuperó el 65 % de los polvos. Por lo tanto, se puede concluir que el equipo construido opera de manera adecuada y con eficiencias similares a las reportadas en la literatura científica.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	IV
RESUMEN	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	XII
ÍNDICE DE TABLAS	XVI
LISTA DE ABREVIATURAS	XVIII

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN	1
--------------	---

CAPÍTULO 2

ANÁLISIS DE FUNDAMENTOS	4
2.1. Breve historia del secado	4
2.2. Tipos de secadores	4
2.2.1. Secador por aspersión	5
2.2.2. Clasificación de los sistemas por aspersión	6
2.2.3. Elementos del secador por aspersión	7
- Sistema de calefacción del aire	7
▪ Combustión directa de un hidrocarburo	9
▪ Intercambiadores de calor con vapor de agua a presión	9
▪ Resistencias eléctricas calefactoras	9
- Sistema de atomización del producto líquido	9
▪ Carrusel centrífugo	10
▪ Boquilla de presión o de vórtex	10
▪ Boquilla de doble fluido o neumática.	10

- Cámara de secado	12
▪ Secadores de flujo en co-corriente	14
▪ Secadores de flujo en contracorriente	15
- Sistema de separación de polvo (ciclón) y colectores	17
▪ Dimensionamiento del ciclón	19
2.3. Factores que intervienen en el proceso de secado por aspersión	24
2.4. Factores que afectan el secado	25
2.4.1. Agentes secantes	25
2.4.2. Elección de las condiciones de operación	25
2.4.3. Temperatura	27
2.4.4. Velocidad del aire	28
2.4.5. Tiempo de residencia dentro de la cámara de secado	28
2.4.6. Pre-tratamiento de la alimentación (jugo de jitomate)	28
2.4.7. Balance general de masa y energía	30
2.4.8. Funcionamiento del secador por aspersión	32
2.5. Parámetros del producto terminado	33

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA	38
3.1. Diseño, construcción y ensamblado del secador	38
3.1.1 Establecimiento de las dimensiones del secador	39
3.1.2 Accesorios del secador por aspersión	40
- Sistema de calefacción.	40
- Sistema de manejo de la alimentación.	42
3.2. Diseño del secador por aspersión.	43
3.3. Selección o determinación del material para la cámara de calefacción	44
3.4. Fabricación de las piezas de acero inoxidable	45
3.4.1. Construcción de la cámara de calefacción	45
3.4.2. Construcción del disco distribuidor	46
3.5. Construcción del aislante cerámico	46

3.6. Evaluación de la calidad de los polvos	53
3.6.1. Medición de los parámetros de calidad de producto fresco	54
- Determinación de la humedad	54
- Determinación del color	54
3.6.2. Análisis del producto terminado	54
- Determinación de la humedad	54
- Determinación del color	54
- Análisis estadístico	54
CAPÍTULO 4	
RESULTADOS	56
4.1. Diseño y armado del secador por aspersión	56
4.1.1. Cámara de calefacción secante	56
- Sistema de calefacción del aire secante	56
- Recubrimiento (aislante)	56
- Armado de las piezas	57
4.1.2. Cámara de secado	59
- Balance de materia y energía para la cámara de secado	59
▪ Balance de materia.	59
- Tiempo de residencia	63
- Dimensionamiento del ciclón tipo tangencial.	63
▪ Temperatura del aire	64
▪ Velocidad (v_i) y flujo del aire a la entrada del ciclón	64
▪ Densidad de la partícula (ρ_p)	65
▪ Tamaño de la partícula	65
▪ Caída de presión neumática en el ciclón	66
▪ Cálculo de la eficiencia teórica del ciclón	66
4.2. Construcción y ensamblaje	67
4.2.1. Componentes de vidrio	67
4.2.2. Componentes de acero inoxidable	69

4.2.3.	Componentes del aislante (cerámico)	71
4.2.4.	Ensamblado	72
4.3.	Pruebas de secado	73
4.3.1.	Humedad.	73
4.3.2.	Color	74
4.3.3.	Rendimiento	76
4.3.4.	Eficiencia térmica	78
CONCLUSIONES		83
PERSPECTIVAS		84
REFERENCIAS		85
PÁGINAS DE INTERNET		89
APÉNDICES		90
ANEXOS		107

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1.	Diagrama esquemático de la creación de la gota en un secador por aspersión 6
Figura 2.	Cámara de secado con un plato distribuidor típico (a); cámara de secado con un plato distribuidor helicoidal (Southwell, Langrish y Fletcher, 2001) 8
Figura 3.	Plato distribuidor de flujo lineal (a); plato distribuidor de flujo helicoidal (b) (Boonloi y Promvonge, 2006) 8
Figura 4.	Configuración de la cámara, diseño 4:1 (a); diseño 2:1(b) 13
Figura 5.	Secador por aspersión de tipo co-corriente (Diseñado por Cruz López Alejandro, egresado de Ing. en Alim., UTM, 2009) 15
Figura 6.	Secador por aspersión de tipo contracorriente (Diseñado por Cruz López Alejandro, egresado de Ing. en Alim., UTM, 2009) 16
Figura 7.	Ciclón (a); bolsa de filtro (b); aspersor de agua (c) 18
Figura 8.	Partes del secador por aspersión (Chen y Mujumdar, 2008) 19
Figura 9.	Ciclón de entrada axial y salida axial (a); ciclón de entrada tangencial y salida axial (b) 20
Figura 10.	La eficiencia de un ciclón <i>versus</i> tamaño de partícula (Bahamondes-Santos, 2008) 21
Figura 11.	Esquema de la cámara de un secador por aspersión donde se lleva a cabo la transferencia de materia y energía 31
Figura 12.	Espectro electromagnético 35

	Página
Figura 13.	Modelo tridimensional (a); forma geométrica del espacio CIEL* a* b* (b) 36
Figura 14.	Reacción de Maillard 37
Figura 15.	Pasos que integran la metodología para la construcción del secador por aspersión 38
Figura 16.	Secador por aspersión propuesto por Goula y Adamopoulos (2003) 39
Figura 17.	Cámara de calefacción 40
Figura 18.	Resistencias tipo abrazadera (a); medidor de flujo (b) 40
Figura 19.	Regulador de presión (a); medidor de temperatura (b) 41
Figura 20.	Controlador de temperatura con relevador (a); termopar (b) 41
Figura 21.	Compresor para entrega de aire secante (a); pulsera antiestática (b) 42
Figura 22.	Atomizador neumático (a); bomba peristáltica (b) 42
Figura 23.	Cámara de secado con configuración 4:1 (a); ciclón de configuración tangencial (b) 43
Figura 24.	Cámara de calefacción (a); disco distribuidor (b) 44
Figura 25.	Construcción del disco distribuidor 46
Figura 26.	Adición de agua a la arcilla (a); incorporación total a la mezcla base (b) 47
Figura 27.	Elongación y aplanamiento de manera que se ocupe la masa eficientemente (a); Sonotubo forrado de papel para brindar soporte a la arcilla (b); Se coloca en un cuarto seco y oscuro, con una manta húmeda cubriendo la pieza. Inicia la primera etapa de secado (c) 48

	Página	
Figura 28.	Barbotina con exposición al aire (a); sonotubo anclado a una base de cartón aglomerado (b)	49
Figura 29.	Horno industrial Pujol S.A. Modelo Fusing	50
Figura 30.	Pieza de cerámica esmaltada	52
Figura 31.	Colocación de las resistencias	57
Figura 32.	Ensamblado de la parte interna del cerámico	58
Figura 33.	Armado final	58
Figura 34.	Diagrama de flujo básico del secador por aspersión	60
Figura 35.	Condensación en el equipo a una temperatura $< 78\text{ }^{\circ}\text{C}$ a la salida de la cámara de secado	61
Figura 36.	Densidad bruta del polvo de jitomate (ρ_p) en función de la maltodextrina DE; sólidos de jugo de jitomate (t): maltodextrina (m), (t:m) a temperatura del aire de entrada (T_{ai}), (Adamopoulos y Goula, 2008)	65
Figura 37.	Cámara de secado. La entrada de los flujos de alimentación y de aire secante (a); salida de los polvos + aire y empalme con el ciclón (b); salida de polvos (c)	68
Figura 38.	Ciclón colector. Salida del aire limpio y buscador del vórtices externo (a); entrada del aire + polvo y empalme con la cámara de secado (b); buscador de vórtices interno (c); salida de los polvos (d)	69
Figura 39.	Cámara de calefacción. Primera sección (a); segunda sección (b); cilindro interno (c); cilindro externo (d)	70
Figura 40.	Disco distribuidor	71
Figura 41.	Componentes del sistema aislante	72
Figura 42.	Componentes del secador por aspersión construido	73

	Página	
Figura 43.	Izquierda: Jugo 2, Centro: Polvos recolectados del jugo del Jugo 2 y Derecha: Jugo 2 rehidratado	76
Figura 44.	Aglomeración y adherencia en la cámara de secado	77
Figura 45.	Polvos recolectados de experimento a 23 % de sólidos totales (Jugo 2)	78
Figura 46.	Relación de eficiencia del aislante y su temperatura en el proceso de secado de jugo de jitomate con un contenido de 14 (Jugo 1) y 23 % (Jugo 2) de sólidos totales	79
Figura 47.	Pruebas del comportamiento del cerámico por 2 h	79
Figura 48.	Comportamiento del cerámico en el secado tras haber realizado las corridas al Jugo 1 y Jugo 2	80
Figura 49.	Relación de eficiencia evaporación y temperatura de salida en el proceso de secado del Jugo 1 y Jugo 2	82
Figura 50.	Relación de eficiencia térmica global y temperatura de salida en el proceso de secado del Jugo 1 y Jugo 2	82

ÍNDICE DE TABLAS

		Página
Tabla 1.	Tipos de atomizadores usados en los secadores por aspersión (Chen y Mujumdar, 2008)	11
Tabla 2.	Fórmulas para la predicción del tamaño de gotas (Chen y Mujumdar, 2008)	12
Tabla 3.	Configuración de la cámara de secado en función de la dirección de flujo y del tipo de boquilla	13
Tabla 4.	Características del secado por aspersión a co-corriente y contracorriente	17
Tabla 5.	Ventajas y desventajas de los sistemas de separación	17
Tabla 6.	Eficiencias de remoción de los separadores ciclónicos con entrada tangencial (García-Sánchez, 2008)	21
Tabla 7.	Ciclón experimental, caída de presión (Dirgo y Leith, 1985)	24
Tabla 8.	Valores de la temperatura de transición vítrea de maltodextrinas (Roos y Karel, 1991; López-Hernández y Martínez-Álvarez, 2010)	30
Tabla 9.	Balance de materia durante el proceso de secado por aspersión	31
Tabla 10.	Balance de energía durante el proceso de secado por aspersión	32
Tabla 11.	Condiciones generales y sus respectivas limitaciones para mejorar los rendimientos térmicos (Chen y Mujumdar, 2008)	33
Tabla 12.	Propiedades del polvo de jitomate y sus valores típicos (Chen y Mujumdar, 2008)	34

	Página
Tabla 13. Propiedades térmicas de materiales aislantes	45
Tabla 14. Rampas de temperatura para la pre-cocción del cerámico (Villareal-Jiménez, 2004)	50
Tabla 15. Rampas de temperatura para el templado del cerámico	51
Tabla 16. Rampas de temperatura para la cocción del cerámico esmaltado (Villareal-Jiménez, 2004)	52
Tabla 17. Rampas de temperatura para el templado del cerámico esmaltado	53
Tabla 18. Parámetros que intervienen en los cálculos de los balances materia y energía	62
Tabla 19. Parámetros de operación del secador por aspersión con una presión en boquilla de 2.5 bar para el deshidratado de jugo de jitomate	62
Tabla 20. Comparativo de condiciones de operación de un secador comercial con el construido en este trabajo	63
Tabla 21. Condiciones en la cámara de secado enchaquetada con una presión de 2.5 bar en la boquilla	74
Tabla 22. Humedad final del polvo obtenido en el secador por aspersión	74
Tabla 23. Valores obtenidos por el UltraScan Vis Hunter Lab para la evaluación del color	75

LISTA DE ABREVIATURAS

Símbolo	Definición	Unidad
$D_{3,2}$	Diámetro promedio de la gota	μm
r	Radio del carrusel	cm
M	Velocidad de la masa del asperjado	g/min
Qc	Flujo de aire comprimido	m^3/h
Qf	Flujo de la alimentación	g/min
N	Velocidad del disco	r/min
Nv	Periferia del disco mojado	cm
m	Peso del solido	Kg
t	Tiempo	s
V	Volumen	m^3
S	Flujo de alimentación	Kg/h
G	Flujo de aire	Kg/h
y	Humedad del aire base seca	$\text{Kg H}_2\text{O}/ \text{Kg}_{\text{ss}}$
x	Humedad del sólido base seca	$\text{Kg H}_2\text{O}/ \text{Kg}_{\text{ss}}$
h	Entalpia del sólido	J/s
H	Entalpia del aire	J/s
Cp	Capacidad calorífica	J/Kg °C
T	Temperatura	K o °C
C	Porcentaje de carbohidrato de la muestra	%
L	Porcentaje de lípido de la muestra	%
P	Porcentaje de proteína de la muestra	%

A	Porcentaje de ceniza del muestra	%
v/p	Volumen- peso	%
C	Calor húmedo	J/Kg H ₂ O
d	Diámetro	μm
Q	Caudal de aire	m ³ /s
a	Altura de entrada al ciclón	cm
b	Ancho de entrada al ciclón	cm
B	Diámetro de la salida del polvo	cm
F	Altura total del ciclón	cm
I	Altura de la parte cónica del ciclón	cm
h	Altura de la parte cilíndrica del ciclón	cm

Adimensionales

W	Contenido de humedad
a*	Valores positivos (rojo) y valores negativos (verde)
b*	Valores positivos (amarillo) y valores negativos (azul)
C	Saturación
L*	Luminosidad
Nh	Número de cabezas

Letras griegas

μ	Viscosidad	Kg/ms
ρ	Densidad	Kg/m ³
α	Tensión superficial	lb/min ²
ω	Humedad del producto	Kg H ₂ O/ h
λ	Calor latente de vaporización	J/Kg
η	Eficiencia	%
H	Tono	°
v	Velocidad	m/s

γ Exponente de vórtice

Subíndices

w Húmedo
s Seco o sólidos
e Equilibrio
ch Cámara de secado
a Aire
i Entrada o inicial
o Salida
ref Referencia
loss Pérdida
v Vapor
evap Evaporización
sat Saturación
amb Ambiente
sa Saltación
p Partícula
c Ciclón
m Promedio

Superíndices

· Flujo

Abreviaturas

CIE Comisión Internacional de Iluminación
EVELSA Especialistas en Vidrio y Equipos de Laboratorio Sociedad Anónima
UTM Universidad Tecnológica de la Mixteca

1. INTRODUCCIÓN

El estilo de vida actual obliga a las personas a consumir alimentos procesados que no tienen las mismas características nutrimentales que los alimentos frescos. Consecuentemente, el reto tecnológico de la industria alimentaria es elaborar productos de fácil preparación y de calidad nutrimental alta.

Para abordar este reto se escogió el jitomate como materia prima, por dos razones: Primero, es un fruto con componentes químicos antioxidantes como el licopeno, polifenoles y ácido ascórbico. Estos componentes son termo-sensibles y neutralizan el exceso de radicales libres que afectan negativamente al organismo, además de ayudar a retener nutrientes (Gómez-Gómez, 2009). Segundo, el jitomate tiene varias ventajas a nivel experimental:

- Es económico.
- Se puede procesar mediante el secado por aspersión en pequeñas cantidades.
- No existe ningún problema de salud o de seguridad con el uso de jugo de jitomate como fluido de proceso.
- Es uno de los alimentos más estudiados; como ejemplo se tienen los trabajos realizados por Candelas-Cadillo *et al.* (2005), quien evaluó la cantidad de coadyuvante necesario para minimizar la degradación del licopeno en la obtención de polvos de jitomate. Goula y Adamopoulos (2008), evaluaron los efectos de coadyuvantes sobre la temperatura vítrea de polvos de jitomate y las condiciones de operación para el jugo de jitomate.

El reto de este trabajo consistió en producir polvos de jitomate con pérdidas mínimas de color, así como reducir la aglomeración del producto en el equipo y facilitar su limpieza. Este reto tecnológico tiene la ventaja de ser una operación unitaria utilizada para prolongar la vida de la

materia prima (jitomate) y reducirlos costos de envasado, debido a que se puede sustituir el uso de botellas de vidrio o latas por bolsas de plástico que son más baratas. Asimismo, el peso del producto final se reduce con lo que se disminuye el costo de almacenaje y transporte (Doymaz, 2006).

Con base en lo anterior, el objetivo de este proyecto fue construir un secador por aspersión de jugo de jitomate. Adicionalmente, al no existir un equipo de secado con estas características en la Universidad Tecnológica de la Mixteca (UTM) se logró cubrir una necesidad en el área de Ingeniería en Alimentos. La construcción del secador por aspersión se hizo con la incorporación de componentes y accesorios orientados a reducir la adherencia de los polvos en las paredes, minimizar la pérdida de la calidad y su recuperación fácil y eficiente. Para lograr esto último, se incorporó un ciclón a la salida de la cámara de secado.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo general

Construir un secador por aspersión a escala laboratorio provisto de una cámara de secado con aislamiento térmico y un ciclón para fines didácticos y de investigación. Así como evaluar el funcionamiento del equipo mediante la obtención de polvos de jitomate.

1.1.2. Objetivos específicos

1. Redimensionar la cámara de secado propuesta por Goula y Adamopoulos (2003), a una escala menor.
2. Construir el secador por aspersión.
3. Evaluar el funcionamiento del secador mediante el porcentaje de rendimiento en la obtención de polvos, la eficiencia del aislante de la cámara de calefacción y la calidad de los polvos de jitomate.

1.2. Metas

- 1.2.1.** Escalar la cámara de secado propuesta por Goula y Adamopoulos (2003), (Objetivo 1).

1.2.2. Construir una cámara de aire de calefacción, una de secado y un ciclón (Objetivo 2).

1.2.3. Determinar el rendimiento y la calidad de los polvos colectados (Objetivo 3).

2. ANÁLISIS DE FUNDAMENTOS

En este apartado se introducen los fundamentos del secado por aspersión. Se mencionan las ventajas y desventajas de este proceso; así como las problemáticas del procesado de alimentos y finalmente los avances en el desarrollo y diseño de secadores por aspersión.

2.2. Breve historia del secado

El secado es una de las técnicas más antiguas utilizadas para la conservación de alimentos. El secado de frutas, granos, vegetales, carnes y pescados se ha practicado desde que comenzó la agricultura hasta la actualidad. El secado es uno de los métodos más usados para conservar alimentos. Según Oti y Aztell (1998), los métodos de secado se fueron desarrollando de acuerdo a las condiciones ambientales. Por ejemplo, en zonas áridas y cálidas los alimentos se dejaban secar por la acción del aire, mientras que en zonas frías estos se secaban dejando el producto a la intemperie en las noches heladas y por el día se exponían al sol para que el agua helada se evaporara. En la industria de los alimentos las técnicas de secado han evolucionado hasta el punto de que los productos secos constituyen un sector muy importante de la industria alimentaria. Hoy el mercado alimentario oferta una amplia variedad de productos secos, desde los cereales y rebanadas de frutas hasta los polvos de leche y jitomate.

2.3. Tipos de secadores

La selección de un secador adecuado para la deshidratación de un alimento está en función de la influencia de la transferencia de masa y calor. Los secadores se clasifican en dos tipos de acuerdo al método de suministro de calor (Singh y Heldman, 2009).

Secadores de calentamiento indirecto. También llamados secadores por conducción, de contacto o discontinuos. En estos secadores la transferencia de calor al sólido húmedo se lleva

a cabo a través de una pared de retención. El líquido vaporizado se separa independientemente del medio de calentamiento (Perry *et al.*, 1996). La desventaja de este tipo de secado se debe a que es necesario usar agitación con el fin de asegurar una mejor transmisión de calor y eliminar los gradientes de humedad en el producto, lo que se ve finalmente reflejado en el costo del equipo. Algunas ventajas de estos secadores son: permitir la recuperación de la fase líquida, así como secar a presiones reducidas y atmósferas inertes. Debido a esta propiedad, son aplicados para secar productos termolábiles o de fácil oxidación. Algunos secadores de este tipo son los secadores de bandejas a vacío, por sublimación (liofilización), de tornillo sin fin y de rodillo.

Secadores de calentamiento directos o secadores por convección. En estos secadores la transferencia de calor para el secado se produce por contacto directo entre los sólidos húmedos y los gases calientes. El líquido vaporizado se arrastra con los gases calientes del secado. Este tipo de equipos también puede operar de forma continua o discontinua (Perry *et al.*, 1996). Estos secadores son los más utilizados en la industria alimentaria debido a que son sencillos y fáciles de usar. Constan de una cámara de secado, un sistema de calefacción y de un sistema impulsor de aire. Algunos ejemplos de estos, son los secadores de horno, de bandejas o de armario, de túnel, de cascada, de lecho fluidizado, de cinta transportadora, de torre, rotatorio, de arrastre neumático y por aspersion. Este último es el secador objeto del presente estudio, debido a que actualmente no se cuenta con un equipo de esta naturaleza en la Universidad Tecnológica de la Mixteca. Las ventajas tecnológicas de un secador por aspersion consisten en obtener polvos con un volumen y peso reducido en tiempos cortos de secado. Los polvos, producto del secado, favorecen una disminución en el costo por el embalaje y transporte de los mismos. La reconstitución de los polvos es rápida y sencilla. Los costos de operación del secado por aspersion a nivel laboratorio son bajos con respecto a los secadores de lecho fluidizado, los cuales son una alternativa de costo alto para la obtención de polvos.

2.3.2. Secador por aspersion. El secador por aspersion también se conoce como de atomizador, de rocío o *spray*. En este proceso se realiza la transformación del material de

alimentación de forma líquida a forma de polvo seco. Este secado se fundamenta en la generación de gotas minúsculas, que en conjunto poseen una gran área superficial para la evaporación del agua, Figura 1. El agente secante suele ser un gas caliente introducido en gran volumen con la suficiente energía para completar la evaporación del líquido (Geankoplis, 1998). Este tipo de secado se emplea en la industria de los alimentos para la deshidratación de leche, papillas, pastas y jugos.

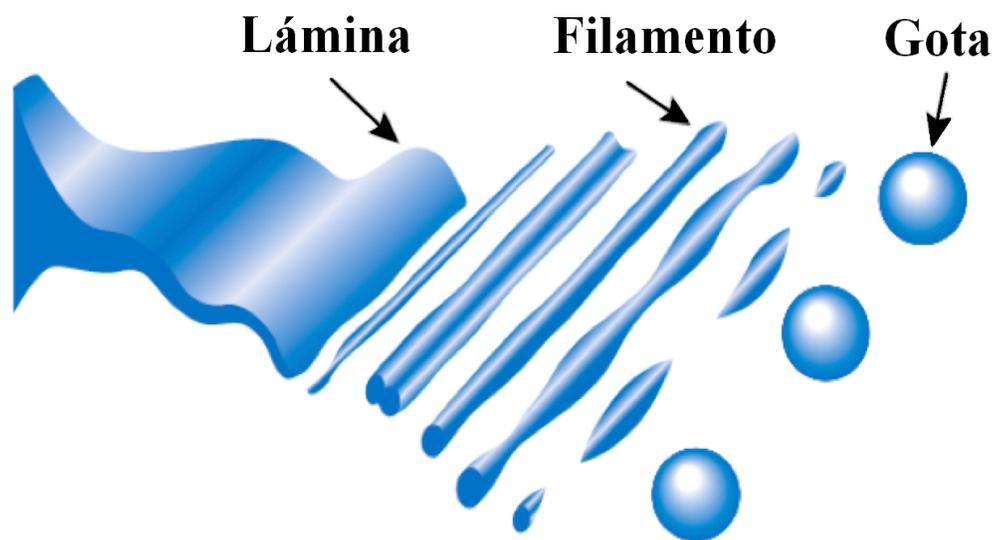


Figura 1. Diagrama esquemático de la creación de la gota en un secador por aspersión¹

2.3.3. Clasificación de los sistemas por aspersión. Una posible clasificación de los sistemas por aspersión se puede hacer sobre la base de los elementos del secador por aspersión, los cuales dependen a su vez del producto a secar. El elemento principal son las boquillas que están diseñadas en función del intervalo de viscosidades de la alimentación, de la dirección del aire secante y de la forma de la cámara. La dirección del aire secante dentro de la cámara se configura de acuerdo a la sensibilidad al calor del alimento a secar. La geometría de la cámara es cilíndrica y la forma puede ser larga o corta, con razones típicas de

¹ Schick R. J. and Spraying Systems Co. (2008). *Spray technology reference guide understanding drop size*. "Spray analysis and research services". URL: http://service.spray.com/lit/view_lit.asp?code=B459C. Accessada 20/Nov/2011

altura/diámetro de 4:1 y 2:1, respectivamente. El cilindro de forma alargada está diseñado para productos acuosos que son difíciles de secar, mientras que el de forma corta es muy útil para trabajos con disolventes orgánicos.

2.3.4. Elementos del secador por aspersión. Las partes esenciales de un equipo de secado por aspersión son:

- *Sistema de calefacción del aire.*
- *Sistema de atomización del producto líquido.*
- *Cámara de secado.*
- *Sistema de separación de polvo (ciclón) y colectores.*

A continuación se realiza una descripción de cada elemento.

- **Sistema de calefacción del aire.** El secado del producto, como se mencionó anteriormente, consiste en hacer pasar un flujo de aire caliente a un fluido asperjado.

Plato distribuidor del aire. Es necesario colocar un plato distribuidor del aire para direccionar las trayectorias de las partículas en el secador y de esta manera, mejorar los tiempos de secado. En la Figura 2 se muestra el efecto del plato distribuidor (Southwell, Langrish y Fletcher, 2001).

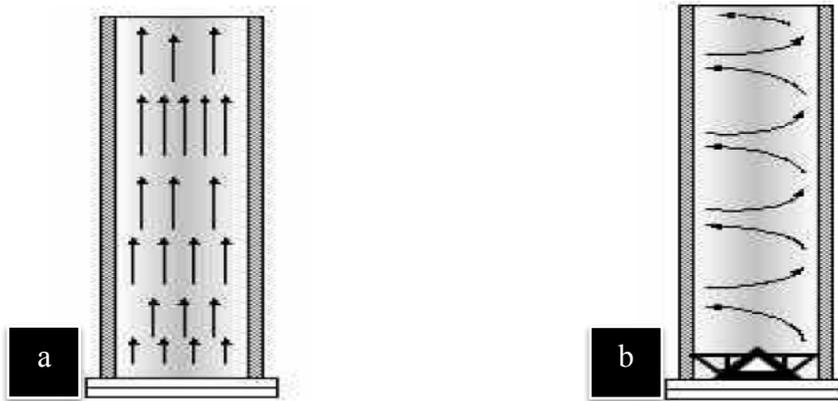


Figura 2. Cámara de secado con un plato distribuidor típico (a); cámara de secado con un plato distribuidor helicoidal (Southwell, Langrish y Fletcher, 2001)

El flujo lineal se puede obtener por platos perforados o aspas rectas, Figura 3a. Mientras que el flujo rotatorio se puede obtener con aspas inclinadas, Figura 3b. Esta última configuración permite reducir el tiempo de residencia de los polvos en la cámara de secado hasta en un 30 % (Boonloi y Promvongse, 2006).

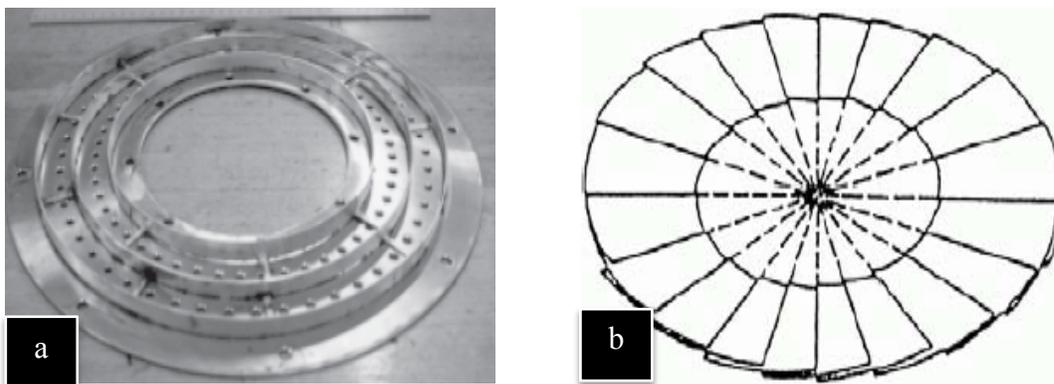


Figura 3. Plato distribuidor de flujo lineal (a); plato distribuidor de flujo helicoidal (b) (Boonloi y Promvongse, 2006)

Calefacción del aire. El aire secante se puede calentar por diferentes métodos a temperaturas que van desde 110 hasta 300 °C.

▪ **Combustión directa de un hidrocarburo.** La combustión directa se da en el seno de la corriente de aire. La ventaja de este sistema es proporcionar un rendimiento máximo,. Sin embargo, como es un sistema de calefacción directa no se puede utilizar en el secado del alimento, debido a que puede contaminar o hacer que el alimento adquiera sabores y olores extraños.

▪ **Intercambiadores de calor con vapor de agua a presión.** Es el procedimiento más utilizado. Las ventajas que ofrece este sistema son dos: 1) Se usa para productos que reaccionan con oxígeno y , 2) Se pueden tener temperaturas muy elevadas si se utilizan quemadores de aceites especiales.

Este sistema es muy económico y consiste en calentar el aire indirectamente. No se recomienda para productos termo-sensibles.

▪ **Resistencias eléctricas calefactoras.** Sistema que se reserva para su uso en instalaciones de pequeña capacidad o piloto por presentar un costo energético alto.

- **Sistema de atomización del producto líquido.** La aspersion o atomización es el paso más importante durante el secado por aspersion. La atomización consiste en obtener un área superficial grande entre las gotas húmedas y el medio secante para facilitar la transferencia de calor y de masa en un tiempo corto. Industrialmente, existen tres sistemas de aspersion o atomización

- *Carrusel centrífugo.*
- *Boquilla de presión (líquido a presión).*
- *Boquilla de doble fluido (aire a presión).*

- **Carrusel centrífugo.** Consiste en un platillo en forma de vaso que gira a una velocidad de entre 5000 y 20000 rpm y a una velocidad periférica de 100-200 m/s. El líquido cae en el centro del platillo y por la acción de la fuerza centrífuga, primero se desplaza en forma de película fina y posteriormente, se dispersa en forma de niebla al llegar a la corriente de aire (Maupoey et al., 2001). Los carruseles centrífugos están diseñados para trabajar con presiones bajas y para alimentos de viscosidad baja en un intervalo de 1.50 a 32.0 cP, como sucede con la leche y la cerveza. Estos carruseles tienen la ventaja de emplear un variador de velocidad con el fin de facilitar la corrección en el tamaño de partícula. Sin embargo, su costo y mantenimiento son altos.

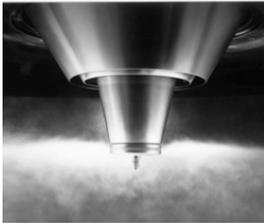
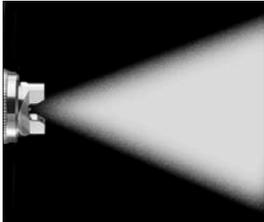
- **Boquilla de presión o de vórtex.** Se basa en la impulsión del líquido a secar a presiones de 10 a 60 kPa a través de boquillas, las cuales constan de un pequeño tubo que imparte al líquido un movimiento en espiral. El líquido sale a través de un orificio en forma de una niebla con una distribución de cono con hueco o sin hueco. Este tipo de boquilla puede ser intercambiable de acuerdo con las condiciones de entrada de la alimentación. Se pueden variar los diámetros de los orificios, el tipo de bomba a usar; por engranaje para presiones bajas y de pistón doble para presiones elevadas. La desventaja de este sistema es su poca practicidad a diferentes viscosidades, ya que cada boquilla sólo sirve para un producto en específico y estas sufren erosión o desgaste.

- **Boquilla de doble fluido o neumática.** Se basa en el empleo de la energía de un fluido auxiliar para dispersar el líquido a secar. El fluido auxiliar suele ser aire comprimido (1-3 kPa) y con menos frecuencia, nitrógeno o vapor de agua. La construcción de una boquilla neumática es sencilla; el dispositivo más común consta de un eje tubular que canaliza la corriente del producto a atomizar y de un tubo anular y concéntrico que rodea al de alimentación. La corriente del fluido auxiliar desgarrando literalmente la corriente del fluido principal en finísimas partículas, la principal desventaja del sistema reside en un tamaño de partículas bastante heterogéneo. Su empleo está casi limitado al secado de líquidos muy viscosos. Algunos fabricantes han incorporado un rubí con una abertura de alta precisión que

se encuentra en la punta de la tapa de la boquilla, lo que garantiza un único tamaño de partícula y permite el uso de esta boquilla por largos períodos de tiempo sin sufrir desgaste (Chen y Mujumdar, 2008).

En la Tabla 1 se presentan los diferentes tipos de boquillas utilizados en la industria alimentaria; las condiciones de operación se incluyen en el Anexo A.

Tabla 1. Tipos de atomizadores usados en los secadores por aspersion (Chen y Mujumdar, 2008)

Tipo	Atomización	Boquilla
Centrífuga o de carrusel		
Vórtex o de presión		
Neumática o de doble fluido		

Para controlar la adherencia de partículas a las paredes del secador es importante tener en cuenta el ángulo de aspersion y el tamaño de partícula. Este último se puede determinar

utilizando microscopía, o también se puede estimar a partir de las fórmulas descritas en la Tabla 2.

Tabla 2. Fórmulas para la predicción del tamaño de gotas (Chen y Mujumdar, 2008)

Tipo de atomizador	Ecuación	Referencia
Rotatorio	$D_{3,2} = \frac{5240 * Mf^{0.171}}{(\pi * D_r * N)^{0.537} * \mu_l^{0.017}}$	Ecuación 1 Master (1991)
Presión	$D_{3,2} = \frac{9575}{\Delta P^{1/3}}$	Ecuación 2 Perry (1984)
Fluido doble	$D_{3,2} = 1920 \left(\frac{\sqrt{\alpha}}{v_a \sqrt{\rho}} \right) + 597 \left(\frac{\mu}{\sqrt{\mu * \rho}} \right)^{0.45} * \left(1000 \frac{Q_f}{Q_{ai}} \right)^{1.5}$	Ecuación 3 Perry (1984)

$D_{3,2}$: diámetro promedio de la gota (μm), D_r : diametro del carrusel (cm), N : velocidad de la masa del asperjado en el carrusel (rev/s), μ : viscosidad del líquido (P), ρ : densidad del líquido (g/cm^3), α : tensión superficial (dinas/cm), Q_{ai} : flujo de aire (m^3/s), Q_f : flujo de la alimentación (m^3/s), M_f : Flujo másico de la alimentación por cada paleta del atomizador ($g/s.cm$), V_{ai} : velocidad del aire (cm/s)

- **Cámara de secado.** En esta cámara se lleva a cabo la operación de secado de las gotas asperjadas, por la acción del aire de calentamiento suministrado. El material utilizado para su construcción en la industria alimentaria es convencionalmente acero inoxidable; sin embargo, a nivel laboratorio es común el uso de vidrio de borosilicato. Este tipo de vidrio es resistente a temperaturas altas y a todos los ácidos excepto al ácido fluorhídrico. Además, este material es impermeable a la humedad y a gases, lo que garantiza que el intercambio de humedad se realice únicamente dentro de la cámara (Perry *et al.*, 1996).

El diseño de la cámara de secado (Figura 4) se realiza de acuerdo con la relación de las dimensiones altura/diámetro. Esta cámara contiene la mezcla del aire caliente con las gotas finamente dispersas del producto a secar. El diseño de la cámara depende en gran medida del tipo de sistema de aspersión más que de la dirección del flujo del aire secante, debido a que se puede combinar las direcciones de flujo de aire secante en la cámara, pero no así del tipo de boquilla, Tabla 3.

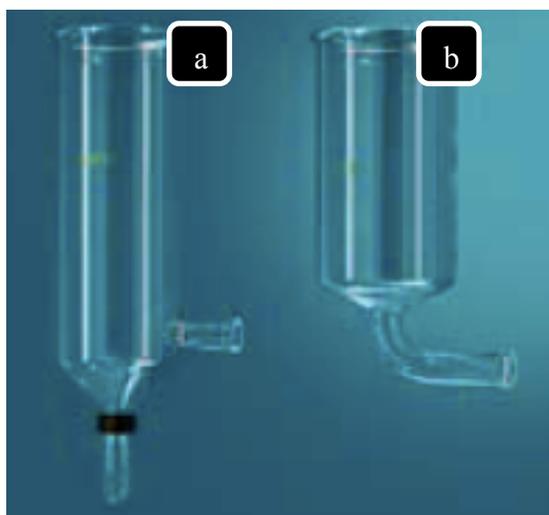


Figura 4. Configuración de la cámara, diseño 4:1 (a); diseño 2:1(b)²

Tabla 3. Configuración de la cámara de secado en función de la dirección de flujo y del tipo de boquilla

Dirección de flujo ¹	Configuración en función del tipo de boquilla ²
Horizontal paralelo (co-corriente).	
Vertical paralelo descendente de flujo lineal de aire.	Diseño de tipo alto, la relación altura-diámetro es 4:1 ó 5:1, este tipo de configuraciones se utilizan principalmente para boquillas de fluido doble y de presión.
Vertical paralelo descendente de flujo helicoidal de aire.	
Vertical paralelo ascendente.	Diseño de tipo bajo o corto, la relación altura-diámetro es 2:1, utilizado para atomizadores de disco rotatorio.
Vertical y horizontal en contracorriente.	

¹ (Maupoey *et al.*, 2001)

² (Langrish, 2007; Buchi-Labortechnik, 2010)

² Buchi-Labortechnik, A. G., 2010, www.buchi.com, accesada el 9/agosto/2011

La cámara de secado está conformada por dos secciones, una cilíndrica donde se produce la evaporación de la humedad de la alimentación, y otra cónica donde se deposita el polvo seco (Figura 4).

Los dispositivos de circulación del flujo en paralelo son los más utilizados por su concepción sencilla y practicidad. En ellos, la mayor parte del agua se evapora cerca del sistema de dispersión del alimento líquido. Con esto, el aire se enfría rápidamente, las paredes permanecen frías y el producto se deshidrata casi completamente.

En los últimos años, la cámara de secado se ha equipado con corrientes laterales de aire fresco a menor temperatura. Su objetivo es crear un movimiento en espiral en el seno de la mezcla aire-polvo, y con esto se logra minimizar la deposición en paredes, facilitar la remoción de polvos y reducir las dimensiones de la cámara de secado.

- **Secadores de flujo en co-corriente.** En un secador de flujo en co-corriente, el flujo de alimentación es puesto en contacto directo con una corriente de aire caliente al entrar en la cámara de secado. La mezcla de los flujos sigue una misma dirección hasta el final de la cámara. Este tipo de secadores se utilizan preferentemente para productos sensibles al calor, debido a que el aire más caliente entra en contacto con las gotas asperjadas cuando tienen su mayor contenido de humedad. Esto proporciona una protección amortiguadora contra los efectos del calor.

La etapa de evaporación se lleva a cabo de manera lenta y con una disminución de la temperatura del aire de calentamiento. El secador mostrado en la Figura 5 es un ejemplo de un secador por aspersión de flujo en co-corriente.

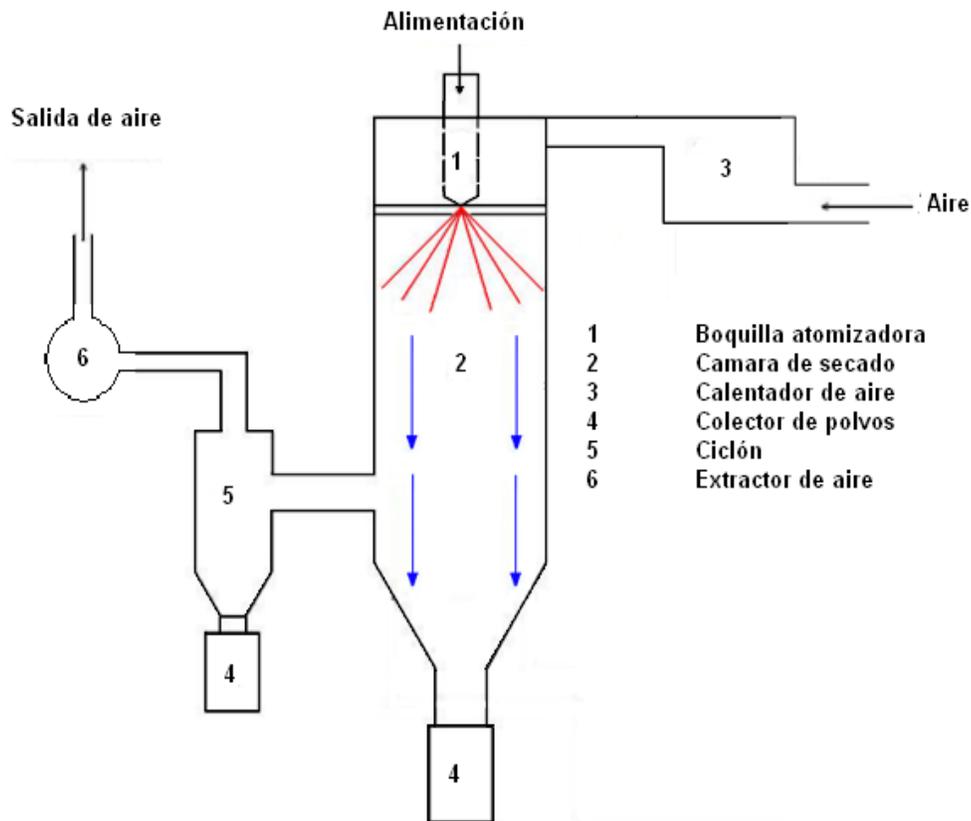


Figura 5. Secador por aspersión de tipo co-corriente (Diseñado por Cruz López Alejandro, egresado de Ing. en Alim., UTM, 2009)

- **Secadores de flujo en contracorriente.** En este diseño de secadores por aspersión, la alimentación se asperja por la parte superior del secador y la corriente de flujo de aire caliente se suministra desde el fondo de la cámara de secado, como se muestra en la Figura 6. El flujo en contracorriente proporciona un tiempo mayor de permanencia en la cámara de secado con respecto al flujo co-corriente. Este tipo de configuración no se utiliza para productos sensibles al calor, debido a que las partículas ya formadas y secas entran en contacto directo con el aire caliente de entrada.

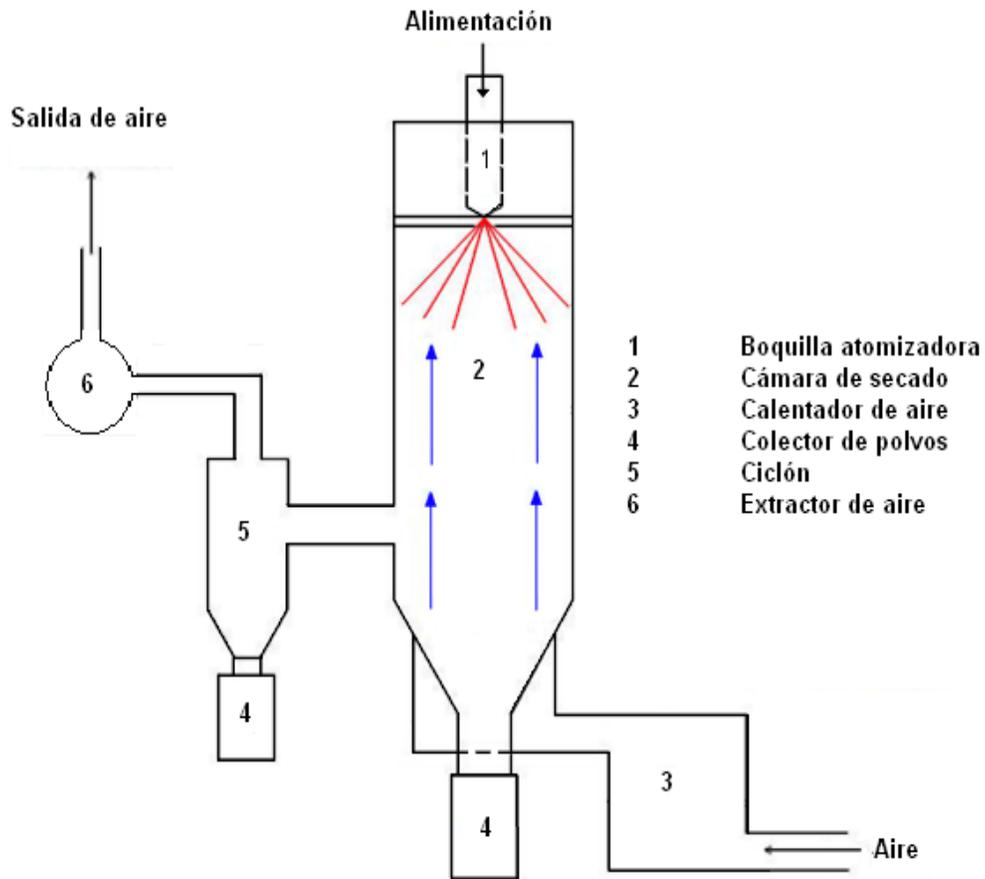


Figura 6. Secador por aspersión de tipo contracorriente (Diseñado por Cruz López Alejandro, egresado de Ing. en Alim., UTM, 2009)

En la Tabla 4 se muestran las ventajas y desventajas de las dos configuraciones de secadores por aspersión.

Tabla 4. Características del secado por aspersión a co-corriente y contracorriente

Co-corriente	Contracorriente
Evaporación brusca en la humedad superficial de la gota asperjada	Maximiza el tiempo de permanencia en la cámara de secado
Menor daño al alimento	No se utiliza para productos sensibles al calor
La etapa de eliminación de humedad es lenta	La etapa de eliminación de humedad es rápida
Temperatura del polvo < a la temperatura del aire secante	Temperatura del polvo \geq a la temperatura del aire secante

- **Sistema de separación de polvo (cyclón) y colectores.** El colector de polvos de la cámara de secado retiene del 10 al 50 % del total de polvo producido. Esta retención depende del material de alimentación, tipo de boquilla y condiciones de operación del secador (Pisecky, 1997). Para recuperar el polvo restante se recomienda el uso de separadores de polvos finos, por ejemplo, un ciclón colector, una bolsa filtro o un aspersor de agua. Estos recuperadores de polvos ofrecen algunos beneficios y desventajas (Tabla 5).

Tabla 5. Ventajas y desventajas de los sistemas de separación

Ventajas	Desventajas	Separador
Económico, eficiente, inversión única, fácil limpieza, facilidad de operación	Eficiencias bajas en la recolección de partículas pequeñas (10 μm), incapacidad de manejar materiales húmedos o pegajosos	Ciclón (Figura 7a)
Muy económico, muy eficiente	Limpieza difícil, necesidad de reposición, posibilidad de incendio o explosión por chispa en las proximidades del filtro, incapacidad de manejar materiales húmedos o pegajosos	Bolsa filtro (Figura 7b)
Minimiza la contaminación del aire, evita explosiones	Recupera polvos hidratados, inversión elevada, diseño complejo	Aspersor de agua (Figura 7c)

En el presente proyecto se usó un ciclón para la separación y recuperación de polvos. Un colector ciclónico o ciclón es un separador centrífugo, donde el chorro de aire que contiene el polvo entra tangencialmente por la parte superior, gira en forma helicoidal descendente y finalmente, asciende por el centro libre de polvos y sale al exterior por diferencia de presión. El polvo arrastrado por el aire es lanzado por la acción de la fuerza centrífuga contra las paredes del ciclón, donde debido al rozamiento pierde su energía cinética y cae al fondo del mismo, de donde se retira continuamente por medio de dispositivos especiales. Según Goula y Adamopoulos (2003), la eficiencia máxima del ciclón es del 88 %. La separación eficiente de polvos depende de tres factores: velocidad de aire alta, partículas grandes y el dimensionamiento radial pequeño del ciclón.

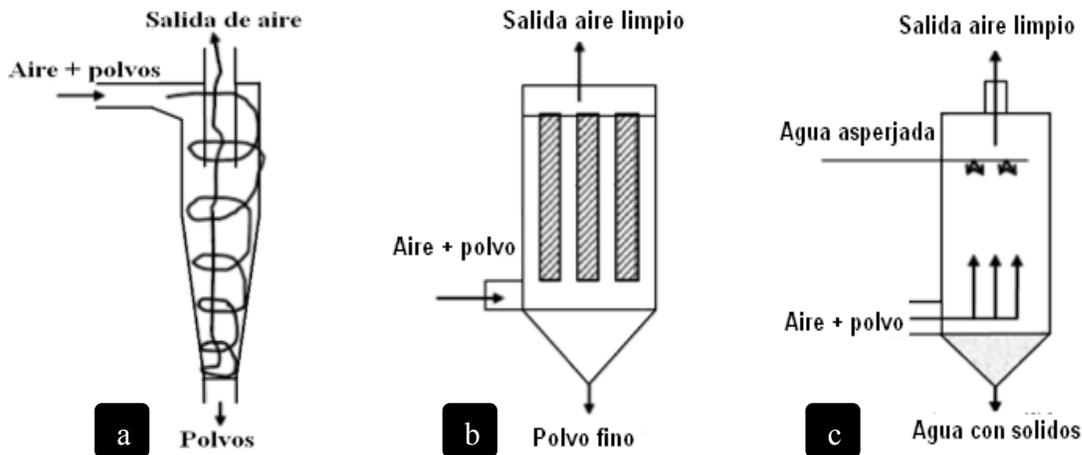


Figura 7. Ciclón (a); bolsa de filtro (b); aspersionador de agua (c)

En la Figura 8 se representa el esquema de una instalación completa de secado por atomización. Por la parte superior de la cámara de secado se introduce el aire caliente producido en el generador y se asperja la suspensión del producto a secar. En la parte cónica inferior se recoge la mayor parte del producto seco, mientras que el aire de secado se escapa por la salida lateral. Este aire arrastrará una porción determinada de polvos finos que se separarán y se recuperarán en los ciclones. El diseño del equipo de atomización depende de dos variables. La forma de dispersión de la alimentación y el tamaño de partícula deseado;

además de las características requeridas en el producto seco (textura, solubilidad, densidad y capacidad de humectación).

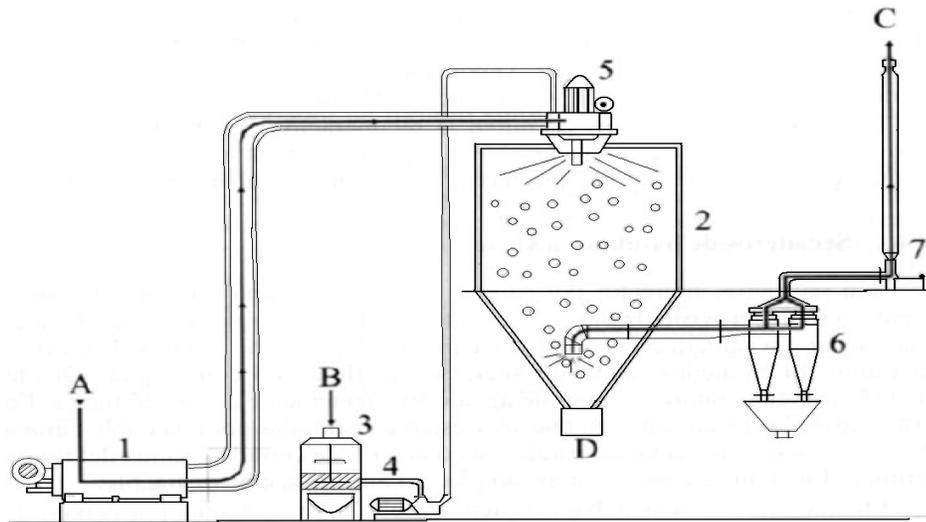


Figura 8. Partes del secador por aspersión. La instalación A es la entrada de aire ambiente (compresor) que se calienta en el generador (quemador o resistencia eléctrica) (1). B es la entrada del producto a atomizar. El aire utilizado sale por el punto C y el producto seco por D. Los componente del secador son: 2, es la cámara de secado; 3, tanque del producto en solución líquida; 4, bomba peristáltica; 5, boquilla de aspersión; 6, ciclones separadores y 7, extractor (Chen y Mujumdar, 2008)

- **Dimensionamiento del ciclón.** Los ciclones son equipos mecánicos estacionarios que se han estado utilizando desde la década de los ochenta, para eliminar el polvo de las corrientes de gas o para separar líquidos que se encuentran en suspensión (Dirgo y Leith , 1985).

Los ciclones pueden tener una entrada de gas en forma axial o tangencial. El ciclón con configuración axial tiene un diámetro menor y altura mayor que el ciclón tangencial; con esta configuración se alcanza una eficiencia alta y una menor capacidad de almacenamiento. Para colectar un máximo de partículas, frecuentemente se conectan varios ciclones en serie. El funcionamiento de estos ciclones es muy similar al ciclón tangencial, solo que a la entrada de

la mezcla (gas-partícula) cuentan con unos álabes fijos que permiten el movimiento en espiral (Figura 9a). El ciclón tangencial es utilizado para separar partículas sólidas de un gas. En este se hace pasar la mezcla a través de la sección superior del dispositivo. El cuerpo cilíndrico induce un patrón de flujo giratorio de la mezcla en forma de vórtice descendente. La fuerza centrífuga separa la partícula de la corriente del fluido, es decir las partículas chocan con las paredes del cilindro y se deslizan por la sección cónica hasta la salida. Por otra parte, el fluido sale a través de vórtices ascendentes, Figura 9b Gutiérrez-Torres *et al.*, 2006.

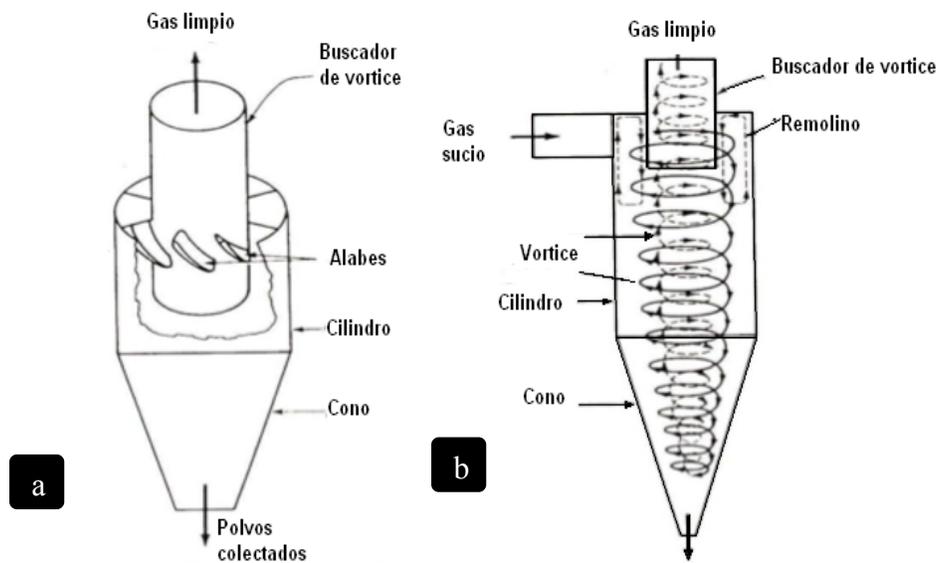


Figura 9. Ciclón de entrada axial y salida axial (a); ciclón de entrada tangencial y salida axial (b)

Las ventajas de ocupar un ciclón colector radican principalmente en la simplicidad de su diseño, así como en los costos bajos de inversión y de mantenimiento. El problema de este equipo radica en su bajo poder de recolección de partículas del orden de 1-5 μm . Esto ha llevado a diferentes diseños de ciclones. Existen tres categorías de ciclones (Figura 10 y Tabla 6); la primera, de eficiencia alta y destacando los modelos de Stairmand (1951) y Swift (1969); la segunda, los convencionales como el de Lapple (1951) y el de Swift (1969); y la última, de gran capacidad (Stairmand, 1951 y Swift, 1969). Estas configuraciones fueron definidas en función de las dimensiones de las partes principales que componen al ciclón; las

cuales, de acuerdo con Swift (1969) “... se desarrollaron casi en su totalidad de manera empírica...”.

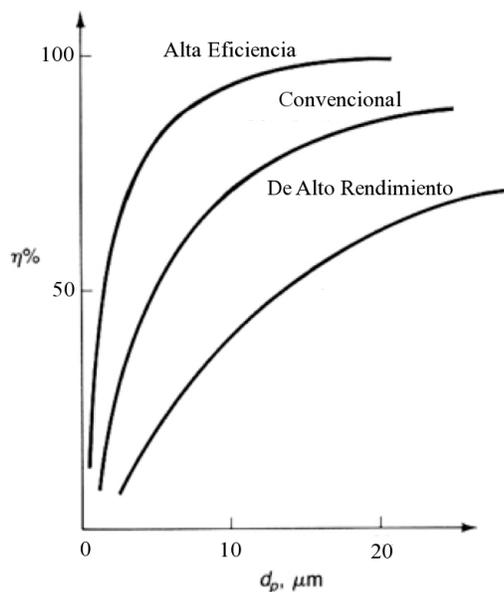


Figura 10. La eficiencia de un ciclón *versus* tamaño de partícula (Bahamondes-Santos, 2008)

Tabla 6. Eficiencias de remoción de los separadores ciclónicos con entrada tangencial (García-Sánchez, 2008)

Clasificación de ciclones	Eficiencia de remoción %		
	Partículas > 10 μm	Partículas 2.5 - 10 μm	Partículas $\leq 2.5 \mu m$
Eficiencia alta	80 – 99	60 – 95	20 – 75
Convencionales	70 – 90	30 – 90	0 – 40
Capacidad alta	80 – 99	10 – 40	0 – 10

El dimensionamiento del ciclón está en función de dos parámetros: la velocidad de saltación y la caída de presión neumática.

Velocidad de saltación (v_{sa}). Es un parámetro fundamental relacionado con la velocidad de entrada. Si la velocidad de entrada es muy baja no permitirá la sedimentación de partículas debido a una fuerza centrífuga limitada. Por el contrario, velocidades altas promoverán la sedimentación. Sin embargo, velocidades muy altas ocasionan la re-suspensión de partículas que ya estaban en reposo, provocando una disminución en la eficiencia de recuperación de polvos en el ciclón. Generalmente, se recomienda que la velocidad de entrada al ciclón esté entre 15.2 y 27.4 m/s (Bahamondes-Santos, 2008).

$$v_{sa} = 4.913 * \frac{(4 * g * \mu (\rho_p - \rho_a))^{1/3}}{3 \rho_a^2} * \left(\frac{(b/d_c)^{0.4}}{((1-b)/d_c)^{1/3}} \right) * d_c^{0.067} * v_i^{2/3} \quad \text{Ecuación 4}$$

En donde:

- v_{sa} Velocidad de saltación (m/s)
- g Constante gravitacional (9.81 m/s²)
- μ Viscosidad del aire (Kg/ms)
- ρ_a Densidad del aire (Kg/m³)
- ρ_p Densidad de la partícula (Kg/m³)
- b Ancho de la entrada del ciclón (m)
- d_c Diámetro de la cámara (m)
- v_i Velocidad del aire en la entrada del ciclón (m/s)

Una relación de $v_i/v_s \leq 1.25$ favorece una eficiencia máxima de colección de polvos. Por otro lado, una relación $v_i/v_s \geq 1.35$ indica una re-suspensión del material en reposo y la eficiencia consecuentemente disminuye.

Caída de presión neumática (ΔP). Parámetro que se puede relacionar directamente a los costos de operación; es decir la caída de presión se da por la pérdida de energía en la entrada

y salida. En el diseño del ciclón colector, la caída de presión ΔP (Pa), está en función de la densidad del gas ρ_a (Kg/m³), su caudal \dot{V}_a (m³/s) y las dimensiones del ciclón, de acuerdo a la siguiente ecuación.

$$\Delta P = \left(\frac{\dot{V}_a}{d^2} \right)^2 * W_1 * \rho_a \quad \text{Ecuación 5}$$

$$W_1 = \left(\frac{11.3}{K_e} + \frac{3.33}{K_b^2 * K_b^2} \right) * (2 * g * \rho_a)^{-1} \quad \text{Ecuación 6}$$

En donde:

ΔP Caída de presión (Pa)

\dot{V}_a Caudal del aire en la entrada del ciclón (m³/s)

W_1 Parámetro de la ecuación de caída de presión

K_e Relación entre el diámetro de salida y del ciclón (d_e/d_c)

K_b Relación entre la altura en la entrada del ciclón y su diámetro (b/d_c)

ρ_a Densidad del aire (Kg/m³)

En la siguiente Tabla 7 se muestran la caída de presión en relación a la velocidad de entrada en el ciclón.

Tabla 7. Ciclón experimental, caída de presión (Dirgo y Leith, 1985)

Velocidad del aire en la entrada (m/s)	Caída de presión (Pa)
5,1	87
10	336
12	516 ^a
15	785
20	1407
25	22205

^a valor interpolado

2.4. Factores que intervienen en el proceso de secado por aspersion

Contenido de humedad. Cuanto mayor es el contenido de humedad del alimento a deshidratar, también es mayor la cantidad de agua a evaporar; por lo tanto, el proceso requiere de mayor cantidad de energía y mayor tiempo de secado. Por esta razón es necesario conocer la cantidad inicial de agua del producto, así como la cantidad de agua que es necesario eliminar. Para el secado se debe considerar que el alimento húmedo está conformado por una parte completamente seca (sólido seco) más una cierta cantidad de agua. La humedad se puede expresar como humedad en base húmeda, (Ec. 7) y en base seca, (Ec. 8).

Contenido de humedad en base húmeda (W_w). Es la cantidad de agua que contiene el producto referido al sólido húmedo (sólido seco + agua):

$$W_w = \frac{m_w}{m_w + m_s} \quad \text{Ecuación 7}$$

En donde:

m_w Peso del agua (Kg totales de agua).

m_s Peso del sólido seco (Kg de sólido seco).

Contenido de humedad en base seca (W_s). Es la cantidad de agua referida al sólido seco:

$$W_s = \frac{m_w}{m_s}$$

Ecuación 8

Humedad libre. Cuando una sustancia se expone a aire no saturado se produce la evaporación del agua contenida hasta que las presiones parciales del vapor contenido en el aire y del líquido contenido en el sólido se igualen. Entonces el sólido y el aire están en equilibrio. A la humedad correspondiente se le llama **humedad en equilibrio**, W_e . Para una temperatura dada, la humedad en equilibrio del sólido dependerá de la humedad relativa que tenga el aire. Cuando se representa gráficamente la humedad relativa frente a la humedad en equilibrio, se obtiene una **curva de equilibrio**, que será distinta para cada sustancia y para cada temperatura.

2.5. Factores que afectan el secado

2.5.2. Agentes secantes. Se usan para arrastrar la humedad fuera del secador. Estos pueden ser: aire, gas inerte (nitrógeno o argón), productos de combustión o vapor recalentado. El más empleado de estos cuatro agentes es el aire, debido a su fácil acceso y uso.

Aire y humedad. El aire es la mezcla de gases que constituyen la atmósfera terrestre y está compuesto en proporciones ligeramente variables de sustancias como el nitrógeno (78 %), oxígeno (21 %), vapor de agua (entre 0 y 7 %) y dióxido de carbono, principalmente.

Para expresar la humedad, se usa la humedad relativa que se define como la razón de la presión de vapor de agua, con respecto a la presión de saturación de vapor de agua a la misma temperatura (Perry *et al.*, 1996). Generalmente se expresa en porcentaje (%). A medida que se incrementa la temperatura del aire aumenta su capacidad de absorción de humedad y viceversa. Cuando el aire contiene agua a su máxima capacidad, se dice que se trata de un aire completamente saturado y por lo tanto, es incapaz de absorber más humedad. Por el contrario, un aire no saturado tiene la posibilidad de absorber una cantidad determinada de humedad hasta lograr su saturación (Hougen *et al.*, 2006).

2.5.3. Elección de las condiciones de operación. Goula y Adamopoulos (2004a) encontraron relaciones entre la concentración de sólidos a temperaturas dadas y el tamaño de

partícula, eficiencia térmica de evaporación, pérdida de polvo, contenido de humedad y la densidad bruta (Anexo B). Desafortunadamente, estos autores no encontraron una temperatura óptima de secado, debido a que el polvo de jitomate es termoplástico y de naturaleza higroscópica. Por otra parte, Candelas-Cadillo *et al.* (2005) realizaron un estudio cromatográfico del contenido de licopeno en polvos de jitomate deshidratados a diferentes temperaturas (170 y 180 °C) y diferentes concentraciones de maltodextrinas (80 y 100 % con respecto a sólidos solubles). Los resultados obtenidos indican que no hay diferencia significativa en el nivel de degradación de licopeno por efecto de la temperatura. Sin embargo, los polvos de jitomate rehidratados fueron muy diferentes con respecto al jugo de jitomate fresco. Los autores atribuyeron este comportamiento a la oxidación.

Para poder seleccionar la temperatura a utilizar en el presente trabajo, se consideraron los resultados de Goula y Adamopoulos (2004b), quienes evaluaron dos condiciones de secado; la primera condición consistió en evaluar la concentración de sólidos en la alimentación; y la segunda, en evaluar la humedad del aire secante. En ambos casos, las variables de respuesta fueron la humedad, tamaño de partícula, la eficiencia térmica y de evaporación (Anexo B). A partir de estos resultados se seleccionó una temperatura de aire secante de entre 130 y 140 °C, debido a que este intervalo se produce el mayor rendimiento de evaporación y eficiencias térmicas para una concentración de 22 % sólidos totales.

Para el suministro de la alimentación se utiliza generalmente una bomba peristáltica, la cual brinda la opción de controlar y proporcionar flujos variables. Por otra parte, no se recomienda variar el flujo de aire secante durante la operación de secado debido a que es complicado y caro controlar un ventilador o compresor.

La presión del aire atomizante fue la última variable analizada. La atomización del fluido de alimentación se produce a lo largo de la boquilla neumática y depende de la presión del aire atomizante. Es decir, la presión se utiliza para ajustar el caudal de aire y dar un asperjado visible con un patrón definido en forma de cono. Un caudal de aire atomizante apropiado evita las siguientes complicaciones:

Formación de gotas de gran tamaño (diámetros del orden de milímetros), Maupoey *et al.* (2001) encontraron que a una presión de 275 kPa, la velocidad de la partícula es muy alta; existe la presencia de goteo en la salida de la boquilla e insuficiencia en el mezclado del aire secante con el flujo.

Obstrucción de la boquilla, esta se da con presiones menores a 140 kPa.

En el presente trabajo, se propuso una presión de aire atomizante de aproximadamente 250 kPa. Esto se justifica en base al estudio realizado por Goula y Adamopoulos (2004a), quienes demostraron que si se aumenta el flujo de aire atomizante, la solubilidad de los polvos tiende a disminuir, mientras que el contenido de humedad y la densidad del polvo aumentan.

2.5.4. Temperatura. Esta desempeña un papel importante en los procesos de secado. En forma general, conforme se incrementa su valor se acelera la eliminación de humedad dentro de los límites físicos. En la práctica del secado de alimentos, la elección de la temperatura se lleva a cabo tomando en consideración el tipo de producto que se va a procesar. Existen diversas temperaturas involucradas en el proceso de secado:

Temperatura de bulbo seco. Es la temperatura del ambiente. Se mide con instrumentación ordinaria; por ejemplo, un termómetro de mercurio indica el contenido de calor sensible del aire (Díaz-Santiago y Barenche, 2005).

Temperatura superficial. Es la del cuerpo a secar; generalmente se mide por medio de un sensor infrarrojo.

Temperatura de bulbo húmedo. Es la temperatura de equilibrio que alcanza un líquido cuando se le transfiere calor por contacto con una masa infinita de gas a una temperatura y humedad dadas (McCabe *et al.*, 1998).

2.5.5. Velocidad del aire. La velocidad del aire es importante considerando que el aire caliente tiene la siguientes funciones (Sánchez y Pineda, 2003):

- *Transmitir la energía requerida para calentar el agua contenida en el material facilitando su evaporación.*
- *Remover humedad del alimento.*

2.5.6. Tiempo de residencia dentro de la cámara de secado. Es el tiempo requerido para atomizar las gotas en la cámara de secado y convertirlas en partículas secas con un contenido mínimo de humedad residual. Este valor se utiliza para prevenir un sobre-dimensionamiento o un sub-dimensionamiento de la cámara de secado.

El tiempo de residencia de las gotas en la cámara varía dependiendo del volumen y la geometría del secador, la distribución del tamaño de la gota y la velocidad del flujo de aire (Zbicinski *et al.*, 2002). En promedio, el tiempo de residencia de la partícula varía de 5 a 20 s a escala laboratorio, y de 20 a 35 s a escala más grande (Masters, 1991). La ecuación 9 permite calcular el tiempo de residencia:

$$t = \frac{V_{ch}}{\dot{V}_a} \quad \text{Ecuación 9}$$

V_{ch} = volumen de la cámara de secado, m^3 .

\dot{V}_a = flujo volumétrico del aire, m^3/s .

El tiempo de residencia se puede calcular usando dinámica de fluidos computacionales. (Mazza *et al.*, 2003).

2.5.7. Pre-tratamiento de la alimentación (jugo de jitomate). En el secado del jitomate, los factores que inciden en la calidad del producto son temperaturas elevadas y tiempos prolongados de exposición a la luz o al oxígeno o a pH extremos (Candelas-Cadillo y *et al.*, 2006). Para disminuir los efectos negativos de estos factores, Gómez-Gómez (2009) recomienda el pre-tratamiento del jitomate con soluciones de $CaCl_2$, $NaCl$ y $Na_2S_2O_5$.

Para el secado por aspersión se recomienda el uso de un coadyuvante. El coadyuvante se define como un producto que mejora, facilita o modifica las características de la solución a asperjar, con el fin de obtener mejores rendimientos en el secado. En la industria alimentaria se utilizan diferentes materiales como coadyuvantes o agentes encapsulantes, como carbohidratos, ésteres, gomas, lípidos, proteínas, materiales inorgánicos. Entre los carbohidratos, se ha reportado el uso de almidones, ciclodextrinas, lactosa, celulosa microcristalina y maltodextrina. Las maltodextrinas son importantes para la preparación de jugos que van a ser deshidratados por aspersión, debido a las siguientes propiedades:

- Las maltodextrinas son consideradas como un ingrediente GRAS (*Generally Recognized As Safe*, por sus siglas en inglés). Una unidad de maltodextrina es equivalente a 10 unidades de dextrosa (IMSA, 2002).
- Son incoloras, inodoras y de baja viscosidad a concentraciones altas, permitiendo la formación de polvos de flujo libre sin enmascarar el sabor original (Ré, 1998).
- Brindan mejores rendimientos que el almidón (López-Hernández, 2006).
- Ayudan a contrarrestar las pérdidas por adhesión a las superficies internas del equipo, provocadas por la presencia de compuestos de bajo peso molecular. (Candelas-Cadillo *et al.*, 2005).
- Aumentan la retención de sustancias volátiles según Frey & King (1986); véase Barbosa-Cánovas y Vega-Mercado, 2000.
- Disminuyen el contenido de humedad, debido a que provocan el desplazamiento del agua hacia el aire caliente Frey & King (1986), véase (Barbosa-Cánovas y Vega-Mercado, 2000).
- Aumentan la temperatura de transición vítrea, T_g (Rodríguez-Hernández y Ruiz-Cabrera, 2004).

Candelas-Cadillo *et al.*, (2005) estudiaron diferentes combinaciones de maltodextrinas y sólidos solubles del jitomate. Los autores reportaron que una concentración mayor de maltodextrina resulta en una pérdida menor de licopeno. Por estas razones, en el presente proyecto se utilizó maltodextrina.

El jugo de jitomate es un producto adherente por lo que es difícil de deshidratar en un secador por aspersión. Durante el proceso, el producto se puede volver muy viscoso y adherirse en las paredes del equipo para formar aglomerados indeseables que a su vez, causan una eficiencia baja en la recuperación de producto y problemas graves de operación del equipo. El jugo de jitomate es difícil de secar debido a que sus azúcares de bajo peso molecular (dextrosa 31°C y levulosa 5 °C) presentan una baja temperatura de transición vítrea (T_g), Goula y Adamopoulos (2008). La matriz de maltodextrinas que soporta a los azúcares de bajo peso molecular durante el deshidratado permite la formación de polvos de flujo libre sin cambiar o enmascarar el sabor original. La formación de esta matriz eleva la temperatura de transición vítrea del polvo (Tabla 8) y consecuentemente, evita su adherencia en las paredes de la cámara de secado y del ciclón.

Tabla 8. Valores de la temperatura de transición vítrea de maltodextrinas (Roos y Karel, 1991; López-Hernández y Martínez-Álvarez, 2010)

Maltodextrinas (DE) *	T_g (°C)
4 - 7	188
9 - 12	160
20 – 23	141

* DE= Equivalente de dextosa

2.5.8. Balance general de masa y energía. El balance de materia y energía para un secador por aspersión permite obtener la eficiencia del secado. La aplicación de estos balances es diseñar el proceso para minimizar las pérdidas de calor y de producto. En la Figura 11 se representa en forma esquemática un secador por aspersión de configuración de flujo en co-corriente, con el flujo de sólidos S_s (Kg/h) y flujo de aire G_a (Kg/h). Para realizar el balance de materia y energía, se utilizan las fórmulas descritas en las Tablas 9 y 10, respectivamente.

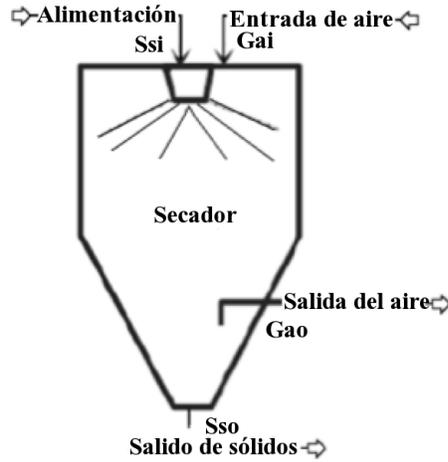


Figura 11. Esquema de la cámara de un secador por aspersión donde se lleva a cabo la transferencia de materia y energía

Tabla 9. Balance de materia durante el proceso de secado por aspersión

Balance	Ecuación	
General de materia	$S_s + G_{as} = S_s + G_{as}$	Ecuación 10
Del agua parcial	$S_s(x_{si} - x_{so}) = G_{as}(y_{ao} - y_{ai})$	Ecuación 11
Humedad extraída	$S_{ss}(x_i - x_o) = \omega$	Ecuación 12

S_s : Flujo del sólido (Kg/h), G: Flujo de aire (Kg/h), ω : humedad del producto (Kg H₂O/h), y: humedad del aire base seca (Kg H₂O/Kg as), x: humedad de los sólidos en base seca (Kg H₂O/Kg ss), los subíndices (s = sólido, as = aire seco, i = entrada, o= salida)

Tabla 10. Balance de energía durante el proceso de secado por aspersión

Balance	Ecuación	
General de energía	$S_s h_{si} + G_s H_{ai} = S_s h_{so} + G_{as} H_{ao} + H_{loss}$	Ecuación 13
	<i>Parcial de energía</i>	
del producto de alimentación	$h_{si} = C_{p_{ss}} \cdot (T_{si} - T_{ref}) + x_{si} \cdot C_{p_{H_2O}} \cdot (T_{si} - T_{ref})$	Ecuación 14
Cp del sólido de alimentación	$C_{p_{ss}} = 1.42C + 1.549P + 1.67L + 0.837A$	Ecuación 15
del aire de alimentación	$H_{ai} = (C_{p_{as}} + C_{p_v} \cdot y_{ai}) \cdot (T_{ai} - T_{ref}) + y_{ai} \cdot \lambda_{ref}$	Ecuación 16
del aire de salida	$H_{ao} = (C_{p_{as}} + C_{p_v} \cdot y_{ao}) \cdot (T_{ao} - T_{ref}) + y_{ao} \cdot \lambda_{ref}$	Ecuación 17
Cp del aire	$C_{pa} = C_{p_{as}} + y \cdot C_{p_v}$	Ecuación 18
del producto en polvo	$h_{so} = C_{p_{ss}} \cdot (T_{so} - T_{ref}) + x_{so} \cdot C_{p_{H_2O}} \cdot (T_{so} - T_{ref})$	Ecuación 19
pérdida en el proceso	$H_{loss} = \frac{T_{ch} - T_{amb}}{R_1 + R_C + R_4}$	Ecuación 20

H y h: Entalpías (J/s), Cp: Capacidad calorífica (J/Kg°C). T: Temperatura (°C), λ_{ref} : calor latente de vaporización a la temperatura de referencia (J/Kg), los subíndices (i, o, s, a, p, ss, as, v, l, 4 y c), representan la alimentación de sólidos, salida de sólidos, sólidos, aire, pérdidas, sólidos secos, aire seco, vapor, cámara, ambiente y enchaquetado, respectivamente. C: porcentaje de carbohidratos, P porcentaje de proteína, L: porcentaje de lípidos, A: porcentaje de cenizas, R: Resistencias (W). T_{ch} : Temperatura de la cámara. T_{amb} : Temperatura del ambiente

2.5.9. Funcionamiento del secador por aspersión

Eficiencia del secador. El funcionamiento de un secador por aspersión usualmente está expresado en términos de la eficiencia térmica global y de evaporación. Estas eficiencias dependen principalmente de las condiciones de operación del secado, principalmente de la temperatura del aire secante a la entrada y a la salida del proceso.

Eficiencia térmica global ($\eta_{térmica}$). Para una operación adiabática, es decir $U < 8 \text{ kJm}^{-2}\text{s}^\circ\text{C}$, la eficiencia se define como la proporción de calor utilizado en la evaporación con respecto al calor gastado total (Ec. 21).

$$\eta_{térmica} = \frac{\text{Calor usado para la evap.}}{\text{Calor gastado}} = \frac{(T_{ai} - T_{ao})}{(T_{ai} - T_{amb})} * 100 \quad \text{Ecuación 21}$$

Eficiencia de evaporación (η_{evap}). El funcionamiento de un secador por aspersion se puede expresar como la eficiencia de evaporación, definida como la proporción de la capacidad actual de evaporación obtenida a la temperatura del aire saturado (T_{sat}), Ec. 22.

$$\eta_{evap} = \frac{\text{Calor usado en la evap.}}{\text{Calor requerido para la máx. evap.possible}} = \frac{(T_{ai}-T_{ao})}{(T_{ai}-T_{sat})} * 100 \quad \text{Ecuación 22}$$

Para obtener mejores rendimientos térmicos, es necesario considerar uno o más de los puntos dados en la Tabla 11.

Tabla 11. Condiciones generales y sus respectivas limitaciones para mejorar los rendimientos térmicos (Chen y Mujumdar, 2008)

Condiciones	Limitaciones
Incrementar la diferencia de temperatura entre la entrada y salida para obtener una eficiencia máxima.	El producto sufre daño térmico, que se ve reflejado en la calidad del producto final.
Un sistema de recuperación de calor en la salida del aire.	Se necesita un intercambiador de calor debido a la presencia de polvos finos en la salida de la corriente del aire.
Recircular parte de la corriente de aire que sale hacia la cámara de secado.	Se incrementa la humedad absoluta del aire.
Utilizar concentraciones altas de sólidos y temperaturas altas.	Se ve disminuida la capacidad de asperjar y la alimentación sufre daños por las temperaturas elevadas.
Uso efectivo de aislamiento térmico en la cámara de secado y en ductos.	Dependiente de la conductividad térmica del material.

2.6. Parámetros del producto terminado.

Los polvos obtenidos a partir del secado por aspersion deben evaluarse para determinar su calidad. Los parámetros para evaluar esa calidad pueden ser: la densidad bruta, densidad de la partícula, tamaño de la partícula, la distribución de la partícula y el color. Estas propiedades tienen gran influencia en el valor comercial, requerimientos del empaque, propiedades de la

tubería para el transporte. Es importante también tomar en cuenta las propiedades funcionales del producto como la estabilidad durante el almacenado, medida a través de la: dispersabilidad, flotabilidad y solubilidad. Tabla 12.

Tabla 12. Propiedades del polvo de jitomate y sus valores típicos (Chen y Mujumdar, 2008)

Propiedades	Valores
Humedad	2 - 5 % peso/peso
Tamaño de la partícula	10 - 200 μm
Densidad bruta	0.14 - 0.17 g/mL
Propiedades de reconstitución	
○ <i>Humectabilidad</i>	10 - 60 para polvos instantáneos
○ <i>Dispersabilidad</i>	Rápida dispersión
○ <i>Hundimiento</i>	Rápido hundimiento
○ <i>Solubilidad</i>	92-99 %

A continuación, se describe brevemente el parámetro de color, utilizado para evaluar el efecto del secado de jitomate en el presente trabajo.

Color. Es la sensación que producen los rayos luminosos en los órganos visuales y que son interpretados en el cerebro (Walter, 2005). Se trata de un fenómeno fisicoquímico donde cada color depende de un intervalo de longitud de onda localizado entre 380 y 770 nm (Gómez-Gómez, 2009), Figura 12.

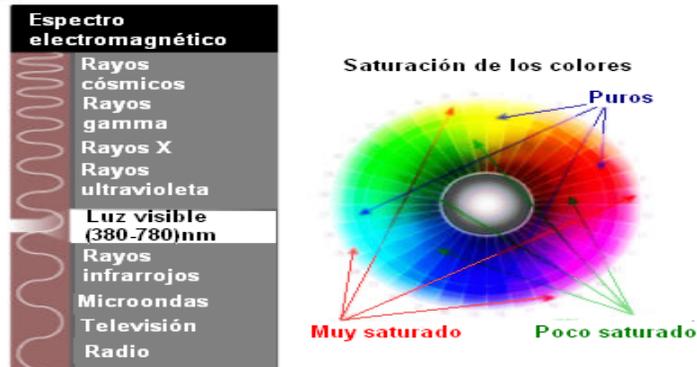


Figura 12. Espectro electromagnético ³

Existen varios sistemas para la medición de color, entre ellos tenemos al Munsell, CIE y Hunter. De estos, el sistema más utilizado en la industria alimentaria es el propuesto por la Comisión Internacional de Iluminación (CIE).

En 1931, la CIE empezó a desarrollar métodos con el fin de describir de manera completa todos los colores que el ojo humano puede percibir. No fue hasta 1976 que se estableció el sistema CIEL* a* b* como el sistema más fiable para la reproducción real del color de un objeto iluminado por la luz del día, considerando el iluminante D65 y el observador de 10° (CIELAB, 1971).

Los tres parámetros que describen al color, según la CIE son:

Tono (h): Es el nombre específico que se da a cada color (rojo, azul, amarillo). Ec. 23.

$$h = \tan^{-1}(b^*/a^*) \quad \text{Ecuación 23}$$

Donde b^* es el componente de color entre azul y amarillo y a^* es el componente de color entre verde a rojo. Los valores de a^* y b^* pueden estar comprendidos entre +127 y -128. La Figura 13, representa la forma tridimensional de los estímulos perceptibles.

³ URL: http://rayosxadomicilio.mex.tl/232818_Que-son-los-Rayos-X.html. Accesada el 9/enero/2013

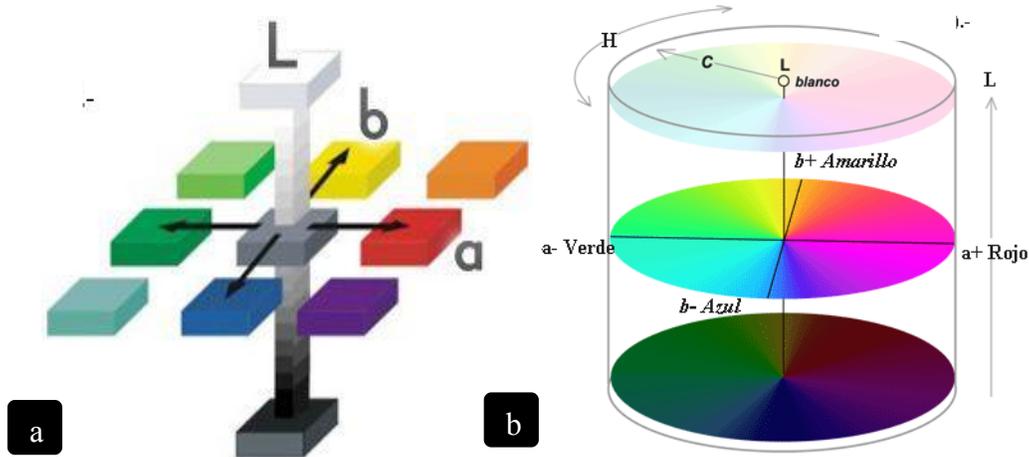


Figura 13. Modelo tridimensional (a)⁴; forma geométrica del espacio CIEL^{*}a^{*}b^{*} (b)⁵

Luminosidad (L^*): La cantidad de luz que tiene un color, proximidad al blanco = 100 ó al negro = 0.

Saturación (C): Es el grado de pureza de un color que se acerca más al color puro correspondiente (Ec. 24).

$$c = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}}$$

Ecuación 24

Efecto del color en el procesamiento de alimentos. Cuando un fruto, como el jitomate es procesado, se modifican diversos factores físicos y químicos, entre ellos el color. Este último es uno de los atributos más importantes para la determinación de la vida útil de un producto y es una cualidad muy apreciada por el consumidor. Existen básicamente tres tipos de reacciones no enzimáticas asociadas con los cambios de color en los alimentos deshidratados: (1) las reacciones de azúcares reductores y aminoácidos (reacciones de Maillard), (2)

⁴ URL: <http://aprende.colorotate.org/color-models.html>. Accesada el 9/enero/2013

⁵ URL: <http://www.proyectacolor.cl/aplicacion-del-color/modelos-de-color/modelo-cie/>. Accesada el 9/enero/2013

reacciones de oxidación, como la conversión de fenoles en quinonas y (3) la degradación de los pigmentos (Cortés y Chiralt, 2008).

En el presente trabajo se evaluó el color rojo, el cual se origina del pigmento más importante presente en el jitomate (licopeno). Los pigmentos sufren deterioro por factores físicos y químicos, como es el caso de la exposición a la luz y a temperaturas elevadas, presencia del oxígeno y pH extremo (Schwarzbatch y Masters, 2001). Factores que son alterados durante el secado por aspersión. Con el fin de evitar el deterioro, Shi *et al.* (1999) sugieren el uso de coadyuvantes que proveen una matriz de soporte al jitomate al secarse y permiten la formación de polvos de flujo libre sin cambiar o enmascarar el sabor original.

Adicionalmente, el proceso de secado puede originar un pardeamiento no enzimático u oscurecimiento no enzimático llamado reacción de Maillard, Figura 14. Esta reacción se lleva a cabo entre grupos carbonilos de los azúcares reductores (aldehídos o cetonas) y grupos amino de los aminoácidos. Los productos de esa reacción son responsables de otorgar sabores extraños, reducir la solubilidad de las proteínas y disminuir el valor nutritivo del producto final, Figura 14, (Badui, 2006). El oscurecimiento de los polvos se evalúa a través la medición del parámetro L* (luminosidad).

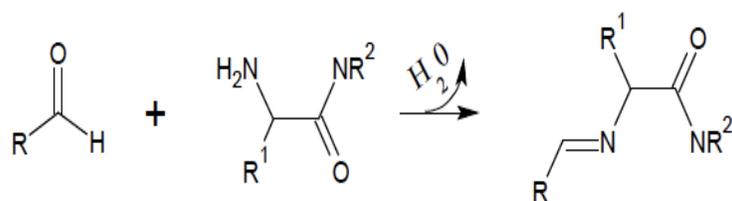


Figura 14. Reacción de Maillard

3. METODOLOGÍA

En este capítulo se describen los pasos que se siguieron para llevar a cabo la construcción del equipo y su la evaluación.

3.1. Diseño, construcción y ensamblado del secador

El proceso usado para la construcción del secador por aspersion, está basado en el método general de diseño industrial, el cual se describe en el diagrama siguiente. Figura 15. (Ulrich y Eppinger, 2004).

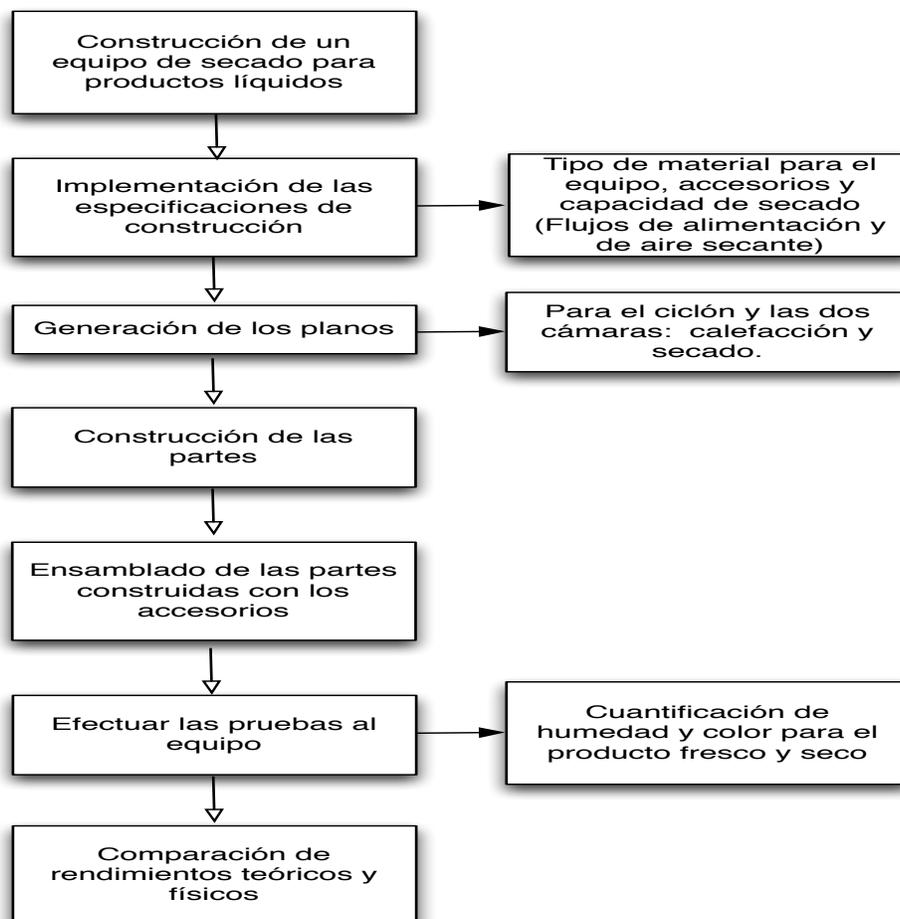


Figura 15. Pasos que integran la metodología para la construcción del secador por aspersion

3.1.1 Establecimiento de las dimensiones del secador. La cámara de secado se seleccionó de configuración alargada (4:1) porque es apropiada para una boquilla de fluido doble (neumática). La cámara de secado se escaló a partir de las dimensiones descritas para la cámara construida por Goula y Adamopoulos (2003) Figura 16. La altura de la cámara se redujo de 43 cm a 35 cm, y el diámetro, de manera proporcional. Esta reducción de tamaño se combinó con la incorporación de un disco difusor en la cámara de aire secante, para tener un suministro de aire secante de 9000 L/h y un flujo de alimentación de 1.5 mL/min.

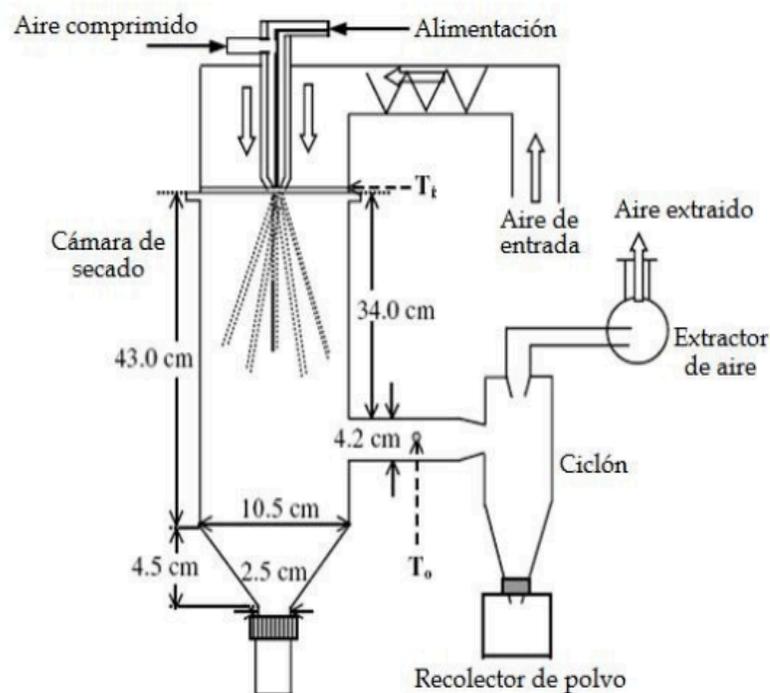


Figura 16. Secador por aspersión propuesto por Goula y Adamopoulos (2003)

La cámara del aire secante o cámara de calefacción se dividió en dos secciones: la interna, la cual contiene a la boquilla y se acopla a la cámara de secado; y la externa, donde se calienta el aire que es enviado a la cámara de secado (Figura 17).

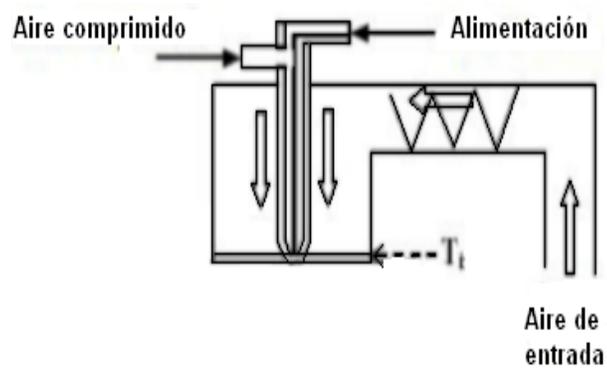


Figura 17. Cámara de calefacción

3.1.2 Accesorios del secador por aspersión. De manera general, las partes y accesorios que conforman al equipo de secado por aspersión son:

- **Sistema de calefacción.**

- Resistencias eléctricas calefactoras. El aire se calentó por medio de resistencias externas tipo abrazadera a una temperatura máxima de 200 °C. Este sistema se colocó en la parte superior del secador (Figura 18).

- Medidor de flujo de aire fabricado en acrílico, marca Cole-Parmer, con una escala de 9000 a 90 000 L/h (Figura 18).

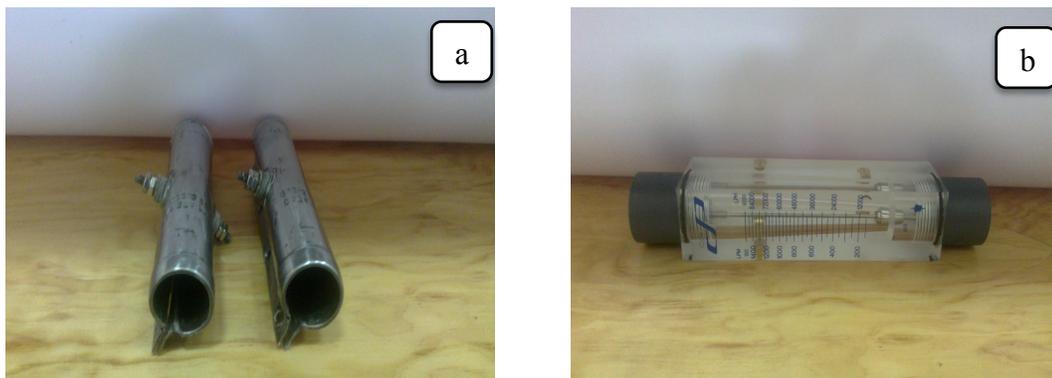


Figura 18. Resistencias tipo abrazadera (a); medidor de flujo (b)

- Regulador de presión con manómetro, marca Bellofram tipo 70, con un intervalo de operación de 14 a 1034 kPa (Figura 19).
- Medidor de temperaturas con dos termopares de sondas auto-adheribles tipo J, marca General, modelo DT80-2 (Figura 19).

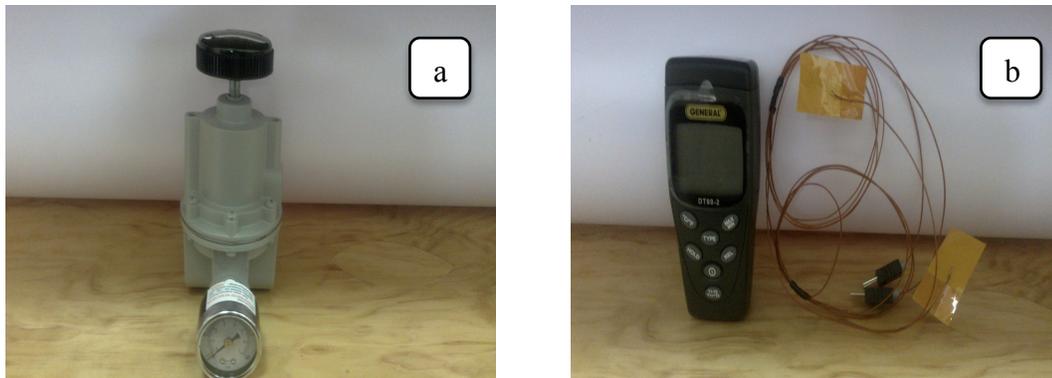


Figura 19. Regulador de presión (a) y medidor de temperatura (b).

- Controlador de temperatura marca Rex modelo C100 con un intervalo de temperatura de 0 a 400 °C, un relevador de 240 V y un termopar tipo J (-210°C a 1050°C), Figura 20.

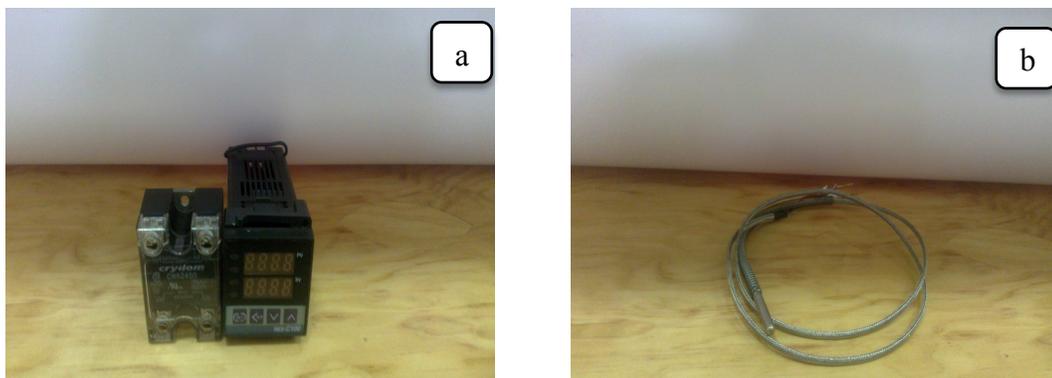


Figura 20. Controlador de temperatura con relevador (a); termopar (b)

- Compresor de aire marca Coleman modelo Blackmay de 3½ Hp con capacidad de 41.64 L y filtros para humedad (Figura 21).

- Pulsera antiestática marca Steren (Figura 21).

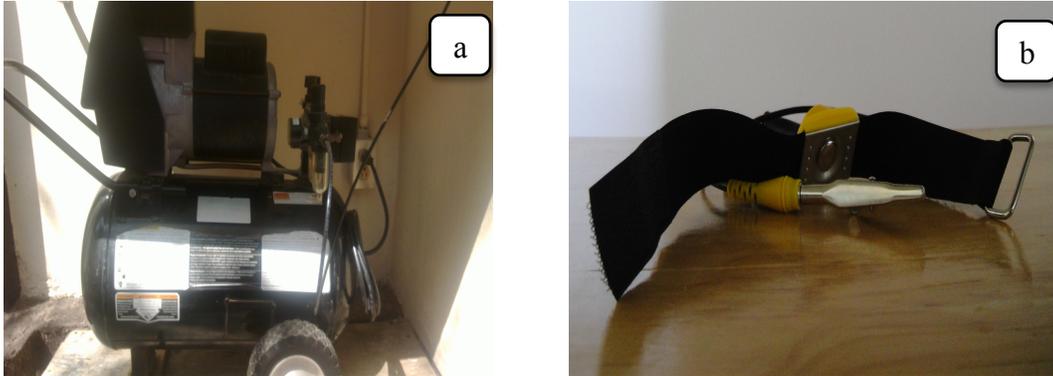


Figura 21. Compresor para entrega de aire secante (a); pulsera antiestática (b)

- **Sistema de manejo de la alimentación.**

- Atomizador neumático marca *Buchi* con un diámetro de boquilla de 0.7 mm y un intervalo de diámetro de gotas asperjadas de 1-25 μm (Figura 22).
- Bomba peristáltica, marca Fisher Scientific, modelo 3386 de flujo medio con un intervalo de flujo de operación de 0.4 a 85 mL/min (Figura 22).

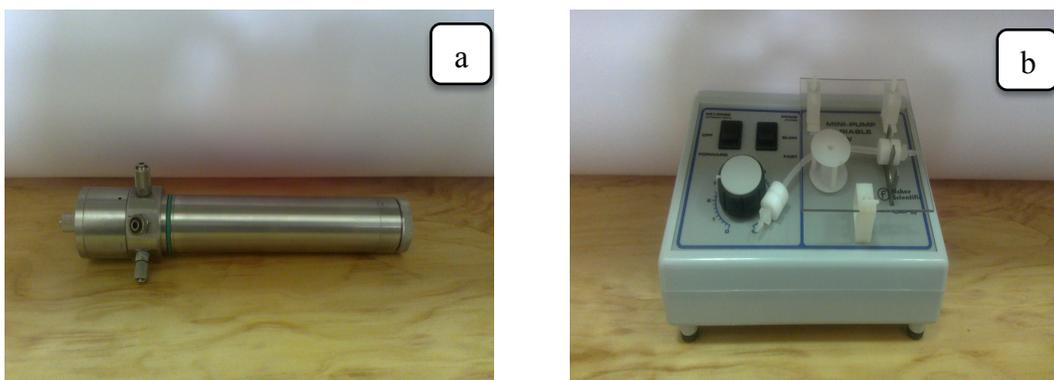


Figura 22. Atomizador neumático (a); bomba peristáltica (b)

- Recipiente de alimentación de jugo. Se utilizó un matraz Erlenmeyer de 125 mL.

- Colectores. El polvo fue colectado en matraces tipo bola de 25 mL de junta esmerilada 19/25.

3.2. Diseño del secador por aspersion.

La cámara de secado se diseñó y construyó de vidrio borosilicato con un espesor de 0.5 cm, con el fin de tolerar las condiciones de operación demandantes por el equipo y para una limpieza relativamente sencilla. (Figura 23, Apéndice 1-A). El ciclón separador de partículas se diseñó de tipo tangencial, debido a que es uno de los más utilizados a nivel laboratorio e industrial (Dirgo y Leith, 1985). El ciclón, al igual que la cámara, se construyó de vidrio borosilicato. En el diseño se consideró dividir al ciclón en dos partes para facilitar su limpieza. Se utilizaron bridas para su ensamblado. Tanto la cámara de secado como el ciclón separador se maquilaron en los talleres de EVELSA, en la ciudad de Puebla (Figura 23, Apéndice 1-B).

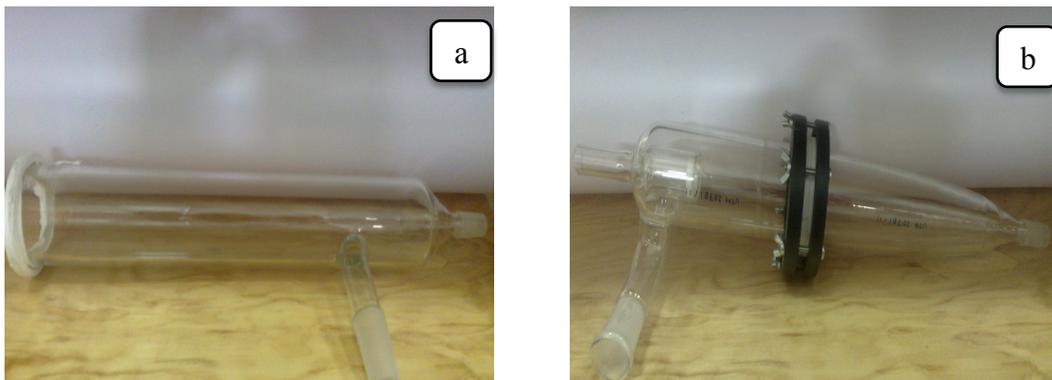


Figura 23. Cámara de secado con configuración 4:1 (a); ciclón de configuración tangencial (b)

El diseño y construcción de la cámara de calefacción está constituida de dos partes. La primera parte contiene la boquilla y está directamente en contacto con la cámara de secado. La segunda parte está conformada de resistencias calefactoras (Figura 24, Apéndice 1-C) y de un sistema aislante de arcilla refractaria.

A la salida de la cámara de calefacción se incorporó un disco distribuidor (Figura 24, Apéndice 1-D) para regular la distribución del aire secante dentro de la cámara de secado, así

como para sujetar y orientar la boquilla neumática. La cámara de calefacción y la cámara de secado se unen por medio de bridas. Esto permite un montaje sencillo de las dos cámaras y sus componentes; y por lo tanto, facilita la limpieza del equipo después de su uso.

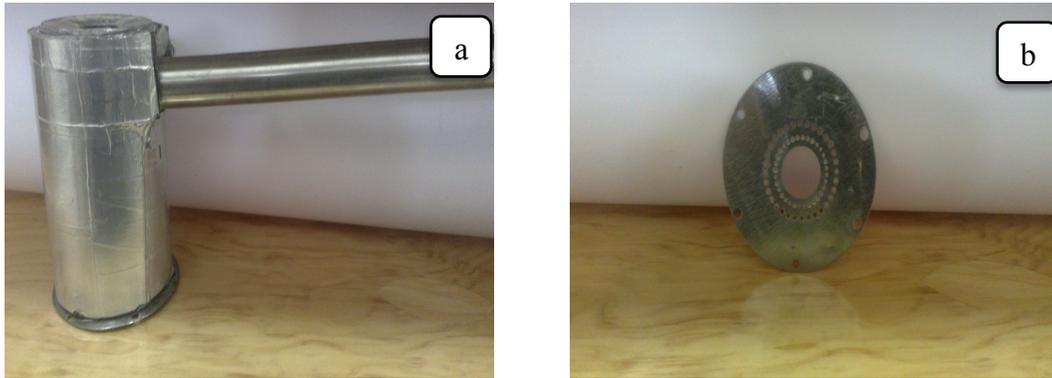


Figura 24. Cámara de calefacción (a); disco distribuidor (b))

La cámara de calefacción y el disco distribuidor de aire se fabricaron en el Taller de Metales y el sistema aislante fue construido en el Taller de Cerámica; ambos pertenecientes a la UTM.

3.3. Selección o determinación del material para la cámara de calefacción.

La selección del material utilizado para minimizar las pérdidas de calor generado por las resistencias calefactoras del equipo, se realizó con base en sus propiedades térmicas. Esto implicó primero, identificar los materiales que comúnmente se utilizan como aislantes. Posteriormente, se consideraron aquellos materiales capaces de resistir temperaturas superiores a los 200 °C. También, se tomaron en cuenta materiales con una *difusividad térmica*, α , baja para que presentaran un perfil de propagación de temperatura pobre. Así como un *coeficiente de conductividad*, κ , bajo, indicativo de una capacidad limitada para transmitir y conducir el calor, Tabla 13.

Tabla 13. Propiedades térmicas de materiales aislantes

Material	ρ (kg/m ³)	Cp (J/Kg K)	κ (W/mK)	α , x10 ⁻⁶ (m ² /s)
Arcilla refractaria ^a	---	---	(T=200°C) 1.00 (T=600°C) 1.47	---
Asbesto ^b	470-570	816	0.15	0.33-0.4
Fibra de vidrio ⁶	220	795	0.035	0.2
Lana o colcha de vidrio ⁷	2000	670	0.037	0.028

^a Kern, 2000, ^b Holman, 1999.

3.4. Fabricación de las piezas de acero inoxidable. Esta sección se manufacturó de acuerdo a los planos en 2D de la cámara de aire secante y del disco distribuidor respectivamente (Apéndice 1-C y 1-D).

3.4.1. Construcción de la cámara de calefacción. Para construir la cámara de aire secante, se cortaron dos láminas con espesor de 2 mm, una de 16.7 x 30 cm y la otra de 20 x 30 cm con una cizalla motorizada marca Dizher, modelo D047R. Estas dos láminas se moldearon y soldaron para formar dos tubos concéntricos. La lámina de 33 x 33 cm se cortó en un torno convencional de 4 mordazas marca Ilsa, modelo TR, 1000-EX y se utilizó para fabricar el anillo que une a los dos tubos de diámetro interno de 5.3 cm y externo de 10.2 cm. A este mismo anillo se le hicieron 6 barrenos de 6.35 mm en la periferia con un taladro fresador marca Titanium modelo ZAY7032. Estos 6 barrenos son los que unen a la cámara de aire secante con el disco distribuidor y la cámara de secado. El anillo se soldó a los dos tubos concéntricos. Estos últimos se barrenaron de manera perpendicular con un taladro fresador

⁶ URL: <http://www.miliarium.com/Prontuario/Tablas/Quimica/PropiedadesTermicas.asp>. Accesada el 4/enero/2013

⁷ URL: http://www.texsa.com/es/productos_general.asp?id=tecsound_ft_55_al. Accesada el 4/enero/2013

para acoplarlos a un tubo de 2.54 cm de diámetro x 40 cm de largo. Sobre este tubo se colocaron las resistencias eléctricas y sobre las resistencias se colocó el aislante térmico. Se construyó una tapa metálica de acuerdo al diámetro del tubo con un barreno de 2.54 cm en el centro, la cual se utilizó para introducir la boquilla.

3.4.2. Construcción del disco distribuidor. Este disco se construyó de forma similar al anillo de la cámara de calefacción. El disco distribuidor se diseñó para contener 62 barrenos con la finalidad de dirigir al aire secante en torno al flujo asperjado en el interior de la cámara de secado. Se usó taladro fresador para realizar los barrenos siguiendo los trazos marcados previamente en la lámina (Figura 25).



Figura 25. Construcción del disco distribuidor

3.5. Construcción del aislante cerámico. El diagrama de flujo de la construcción del aislante se muestra en el Apéndice 7. En ese diagrama se describe de manera general el procedimiento para la elaboración de las piezas de cerámica. La pieza interna que está en contacto directo con las resistencias se fabricó por el método de suspensión. La pieza externa se fabricó por el método de placa y se utilizó para cubrir la pieza de cerámica interna y una capa intermedia de colcha de fibra de vidrio. El aislante cerámico tiene la función de focalizar la temperatura en el tubo que transporta el aire secante y reducir las pérdidas de calor en el sistema de calefacción de aire. La colcha de fibra de vidrio se utilizó como un aislante térmico adicional.

Formulado de la arcilla. Para la elaboración del aislante cerámico se utilizó una mezcla de arcilla a base de 99.2 % de arcilla refractaria y 0.8 % de sílice. El mezclado se realizó manualmente por medio de una espátula y se finalizó cuando la sílice se incorporó de manera homogénea en la arcilla refractaria. La sílice se utilizó para actuar como agente fundente y otorgar una mejor refracción al cerámico estructural. Este material se utilizó tanto para la obtención de la pieza laminada como del moldeado (barbotina).

Obtención de la pieza externa, laminada. Esta pieza se obtuvo en tres pasos, que consistieron en la hidratación de la mezcla, el laminado y la evaporación del agua. A continuación se describen esos pasos.

Hidratación de la mezcla. Para hidratar la mezcla se utilizó agua pasada por ósmosis inversa en un porcentaje 40 % (v/p) de arcilla refractaria. En la Figura 26 se ejemplifica el proceso de hidratación y amasado de la mezcla. Con este proceso se obtiene una pasta de cerámica. La preparación adecuada de esta pasta permite ajustar la humedad y asegurar una homogeneidad adecuada del material cerámico.



Figura 26. Adición de agua a la arcilla (a); incorporación total a la mezcla base (b)

Para pasar al moldeado en placa, se deben tomar en cuenta tres consideraciones; primero, la masa no debe agrietarse al ejercerse una cizalla con los dedos; segundo, la consistencia debe

ser húmeda; y tercero, la masa no debe estar pegajosa. Si no cumple con estas tres consideraciones, es necesario mezclar nuevamente hasta obtener una masa apropiada.

Moldeado de la pasta. Consiste en brindarle la forma definitiva a la pieza de cerámica. La pasta o masa preparada se moldea como se ilustra en la Figura 27.

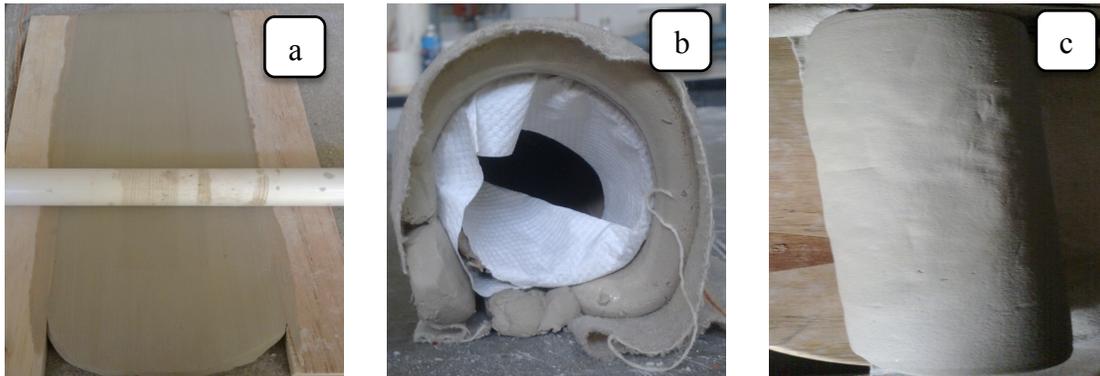


Figura 27. Elongación y aplanamiento de manera que se ocupe la masa eficientemente (a); sonotubo forrado de papel para brindar soporte a la arcilla (b); se coloca en un cuarto seco y oscuro, con una manta húmeda cubriendo la pieza. Inicia la primera etapa de secado (c)

Evaporación del agua. La lámina se dejó en un cuarto cerrado en ausencia de luz y exento de corrientes de aire, y se cubrió con una franela húmeda sin retirar el molde. Esto evitó que la pieza se fracturara por la remoción rápida de agua en su superficie. La lámina se desmoldaba cada 6 h para evitar fracturas por su encogimiento natural. Este encogimiento es del 2 al 3 %. El soporte se retiró entre las 28 y 36 h para asegurar un secado completo y uniforme. Conforme se evaporaba el agua, la lámina se aclaró, hecho que indicó que la lámina estaba lista para someterse a la segunda etapa de secado, un horneado o pre-cocción.

Moldeado de la pieza interna

Hidratación de la mezcla y moldeado de la pasta. Para hidratar la mezcla se utilizó agua pasada por ósmosis inversa en un porcentaje 62.5 % (v/p) de arcilla refractaria. La mezcla de arcilla con sílice se transfirió a una cubeta y se mezcló gradualmente con agua para lograr una pasta homogénea la pasta. El producto de este mezclado se conoce con el nombre de barbotina

(Figura 28). Esto consistió en un vaciado de barbotina en un sonotubo de 5 cm de diámetro, Figura 28. El sonotubo es un molde de cartón comprimido en forma de tubo, que permite el moldeado y fraguado de la barbotina.



Figura 28. Barbotina con exposición al aire (a) y sonotubo anclado a una base de cartón aglomerado (b)

Evaporación del agua. El sonotubo se dejó descubierto para acelerar el secado monitoreándose cada 30 min. La barbotina, al entrar en contacto con el aire formó una capa sólida en su superficie que evitó la evaporación eficiente del agua. Por tal motivo, se realizaron perforaciones desde el centro hacia las paredes del sonotubo en intervalos de 30 min durante 12 h. Al final se formó una capa de un espesor de 2.5 cm. El exceso de la barbotina se decantó. Posteriormente, el moldeado se dejó reposar por 48 h para obtener una capa firme.

Después de la evaporación, las piezas de arcilla se sometieron a una cocción y a un tratamiento de recubrimiento o esmaltado. A continuación se describen brevemente esos procedimientos.

Cocción de las piezas de arcilla. En esta fase de producción, la pieza adquiere sus propiedades definitivas, que consisten en una serie de transformaciones fisicoquímicas de la masa arcillosa provocadas por el aporte del calor. La cocción de la cubierta refractaria se realizó en un horno

industrial marca Pujol modelo Fusing (Figura 29) a una temperatura superior a los 950 °C para poder alcanzar la cocción de la masa arcillosa.



Figura 29. Horno industrial Pujol S.A. Modelo Fusing

La pieza de cerámica se colocó dentro del horno industrial, y este se configuró para tener 5 rampas de calentamiento para alcanzar una temperatura máxima de 950 °C en 6.5 h (Tabla 14).

Tabla 14. Rampas de temperatura para la pre-cocción del cerámico (Villareal-Jiménez, 2004)

Temperatura (°C)	Tiempo (min)
80	60
160	60
400	90
700	90
950	90
Total (min)	390
Total (h)	6.5

La temperatura se monitoreó cada hora con guantes de asbesto y lentes para protegerse de la radiación del horno. Una vez transcurrido el tiempo de cocción, se disminuyó gradualmente la temperatura en 2 rampas durante un intervalo de 3 h para el templado de la pieza de cerámica, Tabla 15.

Tabla 15. Rampas de temperatura para el templado del cerámico

Temperatura (°C)	Tiempo (min)
950-750	60
750-100	120
Total (min)	180
Total (h)	3

Tras haber transcurrido el tiempo de templado, el horno se abrió y se dejó atemperar durante 12 h.

Esmaltado y horneado final del cerámico. Este acabado ayudó a evitar el desprendimiento de la arcilla en forma de polvo desde las paredes de la pieza de arcilla. Este consiste en aplicar un esmalte transparente de temperatura media (1050 °C). El esmalte se aplicó a las piezas de manera diluida con una relación esmalte: agua de 1:3.

Aplicación de esmalte. Las aplicaciones se realizaron con una pistola de presión neumática y se aplicaron varias capas hasta que la pieza de cerámica se volvió de un color blanquecino. En este paso existen tres inconvenientes: primero, que la capa de esmalte sea insuficiente y la absorba la arcilla y no quede con el acabado deseado; segundo, que se tenga un escurrimiento del esmalte; y por último, que se aplique de forma no homogénea y tenga diferencias en la coloración de la superficie del cerámico. Para evitar estos inconvenientes, se eliminó la grasa y se aplicó el esmalte a una distancia aproximadamente de 40 a 50 cm para eliminar escurrimiento y conservar la uniformidad en la adición del esmalte. Se realizaron cuatro aplicaciones. Las piezas se dejaron secar durante medio día para asegurar el secado. Posteriormente, las piezas se sometieron a una cocción de 1050 °C. En la Figura 30 se muestran una pieza esmaltada.



Figura 30. Pieza de cerámica esmaltada

Horneado final. Después de la pre-cocción y posterior al esmaltado, se pueden formar superficies heterogéneas. Por esta razón, se realizó un segundo horneado para evitar defectos en la pieza de cerámica. utilizando las condiciones de horneado descritas en la Tabla 16.

Tabla 16. Rampas de temperatura para la cocción del cerámico esmaltado (Villareal-Jiménez, 2004)

Temperatura (°C)	Tiempo (min)
200	45
350	45
600	45
750	30
950	30
1050	30
Total (min)	225
Total (h)	3.75

De la misma forma que se hizo el horneado anterior, una vez transcurrido el tiempo de horneado, la temperatura de templado de la pieza de cerámica se disminuyó gradualmente (Tabla 17).

Tabla 17. Rampas de temperatura para el templado del cerámico esmaltado

Temperatura (°C)	Tiempo (min)
600	30
300	15
200	15
100	45
Total (min)	105
Total (h)	1.75

Finalmente, el horno se abrió y dejó atemperar durante aproximadamente 12 h.

3.6. Evaluación de la calidad de los polvos.

Obtención y preparación de la muestra. El jugo de jitomate se obtuvo a partir de jitomates frescos comprados en el mercado local de la ciudad de Huajuapán de León. Los jitomates previamente lavados se colocaron en un baño maría por 3 min; posteriormente se les retiró la piel manualmente y se rebanaron en cuartos para la remoción de las semillas. Después, los frutos se molieron por 5 min en una batidora de inmersión marca Moulinex®. La pasta de jitomate obtenida se filtró a través de una manta de cielo para eliminar partículas grandes y homogenizar el jugo. A este jugo se le determinaron los sólidos totales, pesando 10 g de muestra y deshidratándola en una estufa a 110°C por 24 h. Transcurrido este tiempo, las muestras se pesaron y se les determinó el porcentaje de sólidos totales; estas determinaciones se realizaron por triplicado. A partir de estos datos, se calculó la cantidad en gramos de maltodextrina 10 DE (marca Inamalt 110) requerida para tener un jugo de jitomate con un 14 % de sólidos totales. La maltodextrina se agregó lentamente al jugo y se realizó una agitación magnética continua durante un minuto a una temperatura de 40 °C. A este nuevo Jugo de jitomate con 14 % de sólidos totales se le dividió en dos partes. Una parte se conservó tal cual para realizar el primer experimento de secado por aspersion, la otra parte se concentró a 23 % por medio de una evaporación a baño maría por 30 min a 80 °C.

3.6.1. Medición de los parámetros de calidad de producto fresco.

- **Determinación de la humedad.** La humedad se determinó según la norma NMX F-83-1986 por triplicado. Para obtener el contenido de humedad de la pulpa se pesaron 2 g de muestra en una cápsula de porcelana de peso conocido. La cápsula con la muestra se colocó en una estufa a 110°C hasta tener un peso constante. El contenido de humedad de la muestra se expresó en términos de porcentaje de humedad con el uso de la ecuación 7 (Norma Mexicana NMX - F- 83 -1986).

- **Determinación del color.** El color del jugo de jitomate se determinó con un espectrofotómetro HunterLab. Empleando el iluminante D65, con un ángulo y diámetro de observación de 10° y 0.9525 cm, respectivamente. Los experimentos se hicieron por triplicado, adquiriendo los valores de L, a* y b*, y calculando el tono y la cromaticidad, Ecuación 23 y 24 (Gómez-Gómez, 2009).

3.6.2. Análisis del producto terminado.

- **Determinación de la humedad.** El contenido de humedad se determinó en muestras de 2 g de polvos, por triplicado, de acuerdo al procedimiento descrito en la sección 3.6.1.

- **Determinación del color.** Los polvos se rehidrataron con agua en ebullición y la cantidad utilizada de esta fue proporcional a la cantidad removida en el proceso de secado. Para obtener los polvos rehidratados de manera homogénea se llevó a cabo una agitación con una barra magnética durante 1 min. Los parámetros de color del jugo rehidratado de jitomate se determinaron utilizando las condiciones descritas en la sección 3.6.1. Los resultados de la medición del color se obtuvieron por triplicado para cuantificar los errores aleatorios presentes durante el análisis.

- **Análisis estadístico.** Se realizó un análisis comparativo de medias para la humedad y el color, mediante la prueba de *t-student* y método de Tukey

respectivamente, (Walpoe, 1999). Los dos métodos consisten en comparar las medias de los diferentes jugos obtenidos y determinar si existe diferencia estadísticamente significativa con un nivel de significancia del 95% ($p < 0.05\%$). La prueba *t-student* permitió evaluar la posible existencia de diferencias estadísticamente significativas en las humedades de los polvos obtenidos a partir de dos jugos de jitomate (Jugo 1 = jugo con 14 % de sólidos totales y Jugo 2 = jugo con 23 % de sólidos totales). Mientras que la prueba de Tukey permitió evaluar posibles diferencias estadísticamente significativas en los parámetros de color, producidas por el uso de maltodextrinas, evaporación y secado por aspersión durante el procesado de los Jugos 1 y 2. El análisis estadístico se realizó con el programa Minitab, versión 16.1.2.

4. RESULTADOS

En este capítulo se abordan los resultados obtenidos de la construcción del secador, así como de la evaluación de la calidad de los polvos de jitomate. También se determinaron las eficiencias térmicas y los rendimientos.

4.1. Diseño y armado del secador por aspersión.

4.1.1. Cámara de calefacción secante. En esta sección se describirán los resultados del diseño y el armado de los componentes y accesorios utilizados para construir la cámara de aire caliente. Esta cámara se construyó a base de unas resistencias calefactoras y una cubierta de arcilla refractaria (pieza de cerámica) con el fin de focalizar el calor de las resistencias hacia un tubo de acero inoxidable, a través del cual fluía el aire secante.

- **Sistema de calefacción del aire secante.** Para fines prácticos, se propuso utilizar como sistema de calefacción las resistencias eléctricas tipo abrazadera. La potencia de la resistencia calefactora se calculó a partir del flujo de aire secante y la temperatura de operación máxima propuesta para el secado. Las características generales de la resistencia se mencionan en el Apéndice 2-A.

- **Recubrimiento (aislante).** Se evaluaron cuatro materiales aislantes, Tabla 1, para determinar cuál se debía utilizar para minimizar las pérdidas de calor en la cámara de calefacción. Los resultados fueron que a las condiciones ordinarias de operación del equipo, la fibra de vidrio presentó quemaduras en toda la superficie. También, este material al tener poros abiertos permitía el paso del oxígeno a las resistencias generándose ozono, lo que ocasionó una oxidación superficial rápida de las resistencias. Además, con el calentamiento, los cables de suministro de energía se oxidaron y rompieron. Por otra parte, el asbesto

proporcionó eficiencias térmicas por debajo del 30%, y debido a su grado de elasticidad bajo, se produjeron fracturas del mismo; además, resultó difícil de envolver en las resistencias calefactoras. La colchoneta de vidrio no presentó quemaduras sino que se acopló fácilmente a las resistencias, pero presentó eficiencias térmicas bajas $< 30\%$. También, se utilizó la arcilla refractaria, la cual brindó soporte a las resistencias y protección a los cables de la fuente de energía, así como eficiencias térmicas $> 30\%$. Cabe señalar que de manera adicional se evaluaron otros aislantes, como el caucho de silicona y el fieltro sintético, pero los resultados no fueron satisfactorios. Finalmente, a partir de todas las pruebas anteriores, se determinó utilizar la arcilla refractaria y colchoneta de vidrio debido que otorgaron eficiencias del 50%.

La configuración de la disposición de los dos materiales fue la siguiente: el aislante cerámico quedó constituido de dos piezas de arcilla, elaboradas de manera independiente. La pieza interna, a partir de un moldeado donde la etapa clave de su preparación consistió en la obtención de una *barbotina*, mientras que la pieza externa, se obtuvo a partir de una lámina, y en medio de estas se colocó la colchoneta de vidrio.

- **Armado de las piezas.** El armado de la parte calefactora consistió en colocar una tapa de cerámica en un extremo del tubo de acero inoxidable. Seguido de esto, se montaron las resistencias sobre el tubo (Figura 31).



Figura 31. Colocación de las resistencias

Después se colocaron los cables de electricidad de calibre 14 recubiertos con 3 mm de cinta teflón y un colchón de fibra de vidrio para evitar el contacto directo de los cables con las resistencias. Posteriormente es que se monta la pieza de cerámica interna (Figura 32).



Figura 32. Ensamblado de la parte interna del cerámico

Después, la pieza de cerámico se forró con un colchón de fibra de vidrio para minimizar la disipación de calor, y por último se colocó el cerámico externo y se revistió todo con cinta de aluminio, Figura 33.

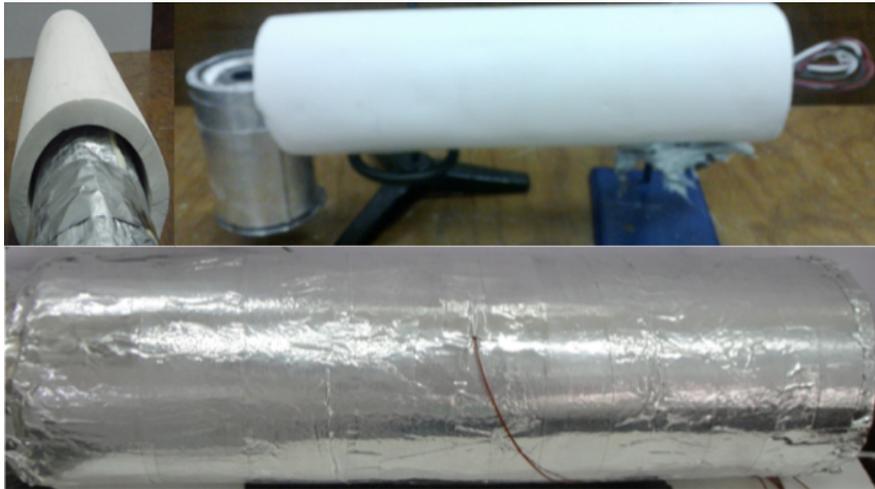


Figura 33. Armado final

Finalmente se colocaron los sensores de temperatura y el controlador de temperatura de las resistencias.

4.1.2. Cámara de secado. En esta sección se describirá el escalado de la cámara de secado y el balance de materia y energía. Asimismo, se realizaron los cálculos del tiempo de residencia de la cámara de secado con el fin de minimizar la pérdida de polvos.

La cámara de secado se escaló de 43 a 35 cm de altura, teniendo como referencia la cámara de Goula y Adamapolous (2004). Esta reducción de dimensiones se realizó con la finalidad de tener un equipo de ensamblado fácil con requerimientos de flujos de aire secante y alimentación menores que los reportados por los autores antes señalados. Debido a que su uso estará principalmente destinado a actividades de investigación y evaluación de condiciones de operación en cursos de Ingeniería en Alimentos.

- **Balance de materia y energía para la cámara de secado**

▪ **Balance de materia.** En el proceso de secado por aspersión, el sólido se introduce en una cámara de secado a una temperatura T_{si} con un contenido de agua inicial X_{si} , y se descarga a una temperatura T_{so} con una humedad final X_{so} . Los valores de X_{si} y X_{so} se expresan en función del contenido de sólido seco (S_s). Siendo S_s el flujo de masa de sólido seco/h que entra y sale de la cámara de secado.

Por otra parte, el aire secante fluye con una rapidez de masa de aire seco G_a/h y sufre un cambio de humedad de Y_{ai} a Y_{ao} , acompañado de un cambio de temperatura de T_{ai} a T_{ao} . En la Figura 34, se muestra el esquema general del secador por aspersión construido con los descriptores de las variables de temperatura y flujo antes mencionados.

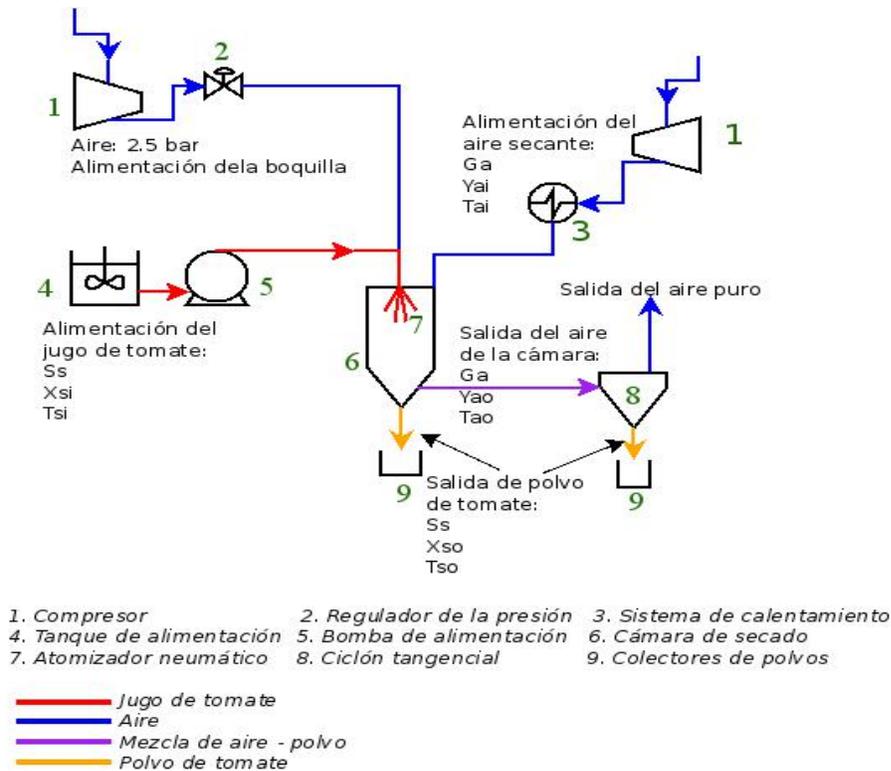


Figura 34. Diagrama de flujo básico del secador por aspersión

El secador por aspersión se equipó con un compresor capaz de entregar flujos máximos de aire de asperjado de 7.54 Kg/h y una bomba peristáltica operada a un flujo máximo de 0.09 Kg/h. La alimentación utilizada en este trabajo consistió de jugo de jitomate con un contenido de 23 % de sólidos totales ($S_s = 0.02$ Kg ss/h) y una descarga de polvos con un contenido de agua del 5 % ($X_{s0} = 0.053$ Kg de H_2O /Kg ss), Tabla 19.

La temperatura y humedad del aire secante utilizados fueron de $T_{ai} = 135$ °C y $Y_{ai} = 10$ %, respectivamente. La asignación de los valores para los parámetros de entrada del aire secante se basaron en los reportados por Goula y Adamopoulos (2008). La presión en la cámara de secado fue de 1 bar y la presión del aire atomizante de 250 kPa. La temperatura a la salida de la cámara de secado fue de $T_{ao} = 85$ °C. Esta temperatura permitió la formación de los polvos y minimizó la adherencia de los mismos a la pared de la cámara de secado. Esto se confirmó con experimentos realizados a una $T_{ao} < 78$ °C, en los cuales se presentó una condensación en las paredes de la cámara de secado, por tal motivo la cámara de secado se envolvió con

colchoneta de fibra de vidrio hasta alcanzar un espesor de aislante de aproximadamente 3 cm, esto permitió que la temperatura no descendiera por debajo de los 78 °C. (Figura 35, Apéndice 2-A).



Figura 35. Condensación en el equipo a una temperatura < 78 °C a la salida de la cámara de secado

Con los datos anteriores se procedió a llevar a cabo el balance de materia. En la Tabla 18, se muestran las capacidades caloríficas del aire, del vapor de agua, de la alimentación y del jugo de jitomate con maltodextrina. Todas las capacidades caloríficas se consideraron constantes en el intervalo de temperatura utilizado para este proyecto. En la Tabla 19 se encuentran las condiciones de operación del secador calculadas, y la energía requerida. Los cálculos para la obtención de las condiciones de operación se describen de manera detallada en el Apéndice 2-A.

Tabla 18. Parámetros que intervienen en los cálculos de los balances materia y energía

Símbolo	Significado	Valor	Referencia
Cp_a	Capacidad calorífica del aire	1006 J/Kg as K	(Geankoplis, 1998)
Cp_v	Capacidad calorífica del vapor	4187 J/Kg agua K	
Cp_{H_2O}	Capacidad calorífica del agua	1996 J/Kg agua K	
Cp_{so}	Capacidad calorífica del polvo	1478.5 J/Kg ss K	Apéndice 2-B
Cp_{si}	Capacidad calorífica del jugo	2270 J/Kg ss K	
λ_0	Calor latente de vaporización a T_0	2501300 J/Kg agua	(Cengel y
T_0	Temperatura de referencia	273.15 K	Boles, 2003)

Tabla 19. Parámetros de operación del secador por aspersion con una presión en boquilla de 2.5 bar para el deshidratado de jugo de jitomate

Parámetros de operación		
T_{ai}	408.15	Temperatura de bulbo seco del aire a la entrada de la cámara de secado (K)
Y_{ai}	0.010	Humedad del aire, en base seca, a la entrada de la cámara de secado (Kg agua/Kg as)
G_a	7.81	Flujo de alimentación (Kg as/h) aire
ρ_a	0.876	Densidad del aire (m^3/Kg)
T_{si}	353.15	Temperatura del jugo de jitomate a la entrada de la cámara de secado (K)
X_{si}	3.545	Humedad del jugo de jitomate, en base seca, a la entrada de la cámara de secado (Kg agua/Kg ss)
S_s	0.042	Flujo de alimentación (Kg ss/h) del jugo de jitomate
T_{so}	358.15	Temperatura de los polvos de jitomate a la salida de la cámara de secado (K)
X_{so}	0.053	Humedad de los polvos de jitomate, en base seca, a la salida de la cámara de secado (Kg agua/Kg ss)
T_{ao}	363.15	Temperatura del bulbo seco del aire a la salida de la cámara de secado (K)
Y_{ao}	0.029	Humedad del aire, en base seca, a la salida de la cámara de secado (Kg agua/Kg as)
h_{si}	1,369,191	Entalpia del jugo de jitomate a la entrada (J/Kg ss)
H_{ai}	163,517	Entalpia del aire a la entrada (J/Kg as)
h_{so}	149,403	Entalpia de los polvos de jitomate a la salida (J/ Kg ss)
H_{ao}	170,432	Entalpia del aire a la salida (J/Kg as)

- **Tiempo de residencia.** El tiempo de residencia está directamente relacionado con las dimensiones de la cámara de secado y se puede calcular a partir de la ecuación 6. El volumen total de la cámara es $V_{ch} = 2.1 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ y el flujo de aire secante utilizado fue $\dot{V}_a = 2.18 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$. A partir de estos datos se determinó un tiempo de residencia de 0.87 s (Apéndice 3).

La Tabla 20 compara una cámara de secado comercial con la construida en el presente proyecto.

Tabla 20. Comparativo de condiciones de operación de un secador comercial con el construido en este trabajo

Concepto	<i>Buchi – 290</i> ^I	Construido
Diámetro	16.5 cm	8.6 cm
Altura	60 cm	35 cm
Partículas de tamaño alcanzado	1 - 25 μm	5 - 20 μm ^{II} 35 - 50 μm ^{III}
Flujo de la alimentación	de 0.1 a 1 Kg/h	0.09 Kg/h
Caudal del aire secante	40 Kg/ h	7.6 Kg/ h
Potencia de calentamiento	2.3 kW	0.37 kW
Temperatura máxima de entrada	220 °C	135 °C
Tiempo de residencia	1.5 s	0.87 s
Costo	250,000. 00 M.N	\$ 61,500.00 M.N ^{IV}

^I Arpagaus y Schwartzbach, 2008. ^{II} Reportado en la tabla de especificaciones del fabricante para la boquilla utilizada en el secador por aspersión. ^{III} Valores calculados por Goula y Adamopoulos, 2008, para la boquilla utilizada. ^{IV} Apéndice 6.

- **Dimensionamiento del ciclón tipo tangencial.**

Establecimiento de las especificaciones para el dimensionamiento. Dentro de las especificaciones se encuentran las siguientes:

- **Temperatura del aire.** La temperatura a la salida de la cámara de secado fue de 85 °C, la densidad y viscosidad del aire fueron $\rho_a = 0.986 \text{ Kg/m}^3$ y $\mu = 2.12 \times 10^{-5} \text{ Kg/ms}$, respectivamente (Anexo C). Esta temperatura se determinó debido a que a medida que el aire acarreador es menos denso se vuelve más viscoso y otorga mejores eficiencias de recuperación de polvos.

- **Velocidad (v_i) y flujo del aire a la entrada del ciclón.** Para la determinación del valor de v_i se tomaron en cuenta las especificaciones recomendadas por Kalen y Zenz (1974) Goula y Adamopoulos (2003) y Mendoza-Galicia *et al.*, (2002). Yanza-Hurtado recomendó una v_i de 12 a 27 m/s, y Kalen y Zenz (1974), propusieron una razón de velocidad del aire entre la velocidad de saltación $v_i/v_s \leq 1.25$ para tener una eficiencia de recuperación de polvos alta.

La **velocidad de saltación** es un parámetro que al dividirse entre la velocidad del aire nos determina si puede o no existir una re-suspensión del polvo en el ciclón. Este parámetro involucra las dimensiones del equipo, el tamaño y densidad de la partícula, así como la del aire. También, estos autores establecieron que a una $v_i/v_{sa} > 1.35$ ocurre una re-suspensión de partículas en reposo, provocando una disminución importante en la eficiencia (Tabla 6). Por lo tanto, para obtener el valor de v_i , primero se fijó el caudal \dot{V}_a ; después, con las dimensiones del ciclón y las propiedades del aire se calculó v_{sa} , Ecuación 4, y finalmente, con estos valores se calculó la razón v_i/v_{sa} . A partir de estos cálculos se determinó que un valor mínimo utilizable de v_i de 12 m/s, Apéndice 4-A.

El caudal de la alimentación utilizado fue de $\dot{V}_a = 0.0025 \text{ m}^3/\text{s}$, proporcional al volumen del equipo. Este valor se encuentra en el intervalo reportado por Goula y Adamopoulos (2003) $\dot{V}_a = 0.006 \text{ m}^3/\text{s}$ y Mendoza-Galicia *et al.* (2003) $\dot{V}_a = 0.06 \text{ m}^3/\text{s}$. A partir de estos datos se estimó un $v_i/v_{sa} = 2.86$. Este valor nos indicó posibles problemas de re-suspensión de polvos en el ciclón. Para evitar pérdidas de polvos por re-suspensión, en la salida del ciclón se incorporó una trampa de polvos.

▪ **Densidad de la partícula (ρ_p).** La densidad de partícula (160 Kg/m^3) se estimó a partir de la relación de la temperatura de aire secante (135°C), así como de la cantidad y tipo de maltodextrina utilizada en el jugo, Figura 36.

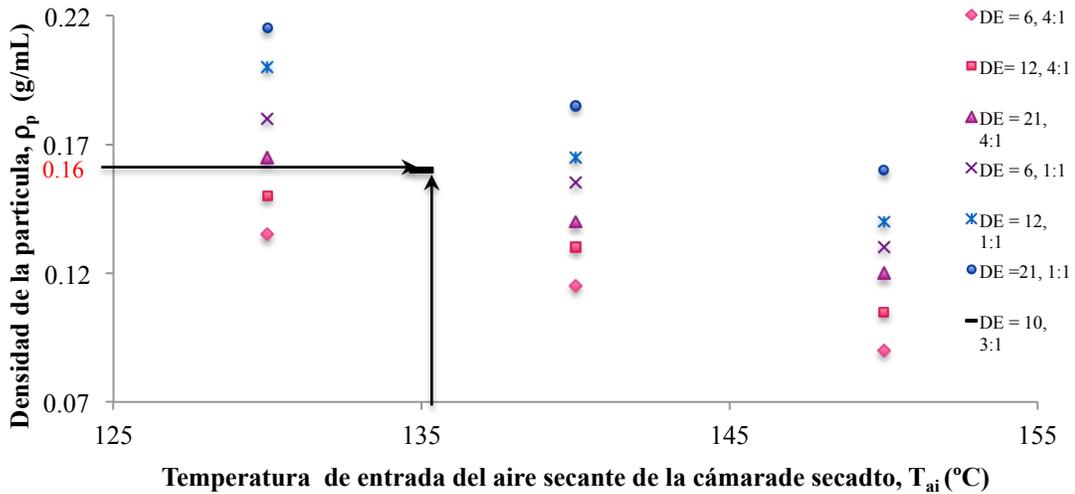


Figura 36. Densidad bruta del polvo de jitomate (ρ_p) en función de la maltodextrina DE; sólidos de jugo de jitomate (t): maltodextrina (m), (t:m) a temperatura del aire de entrada (T_{ai}), (Adamopoulos y Goula, 2008)

▪ **Tamaño de la partícula.** El intervalo de tamaño de partícula producido por una boquilla de fluido doble es de 2.5 a $10 \mu\text{m}$ (García-Sánchez, 2008). Para los cálculos del dimensionamiento del ciclón, se propuso un tamaño mínimo de partícula $d_p = 5 \mu\text{m}$.

Economopoulou y Economopoulos (2002) reportaron que un ciclón corto tiene mejores eficiencias para polvos con $d_p = 5 \mu\text{m}$; mientras que un ciclón largo otorga eficiencias mayores con un $d_p = 10 \mu\text{m}$ (Figura 10).

Las condiciones de operación establecidas para el ciclón fueron: v_i (12 m/s), \dot{V}_a ($0.0025 \text{ m}^3/\text{s}$), ρ_a (0.972 Kg/m^3), μ_a ($2.12 \times 10^{-5} \text{ Kg/ms}$), d_p ($4.4 - 39 \mu\text{m}$), ρ_p (175 Kg/m^3) y T (85°C).

La selección de la configuración del ciclón se realizó a partir de la Tabla 6. Los cálculos se realizaron para partículas de $d_p = 5 \mu\text{m}$ y dos tipos de ciclones, el tipo Stairmand y el tipo Lapple. A partir de la eficiencias teóricas de recuperación de polvos, η , y de la relación de

v_i/v_{sa} obtenidas para cada tipo de ciclón, se seleccionó al de menor v_i/v_{sa} . El ciclón seleccionado fue el tipo Lapple que presentó una $\eta = 66.5$ y una razón de $v_i/v_{sa} = 2.60$. Para el cálculo del diámetro del ciclón, se utilizó una $v_i = 12$ m/s y una $Q = 0.0025$ m³/s provenientes de la cámara de secado. Con estos valores se determinó primero el área del ducto de entrada $Q/v_i = 2.0$ cm², posteriormente se calculó el diámetro del ciclón $d_c = 3.2$ cm y el resto de las dimensiones con base en las relaciones establecidas para un ciclón Lapple (Apéndice 4-A).

- **Caída de presión neumática en el ciclón.** La caída de presión ΔP (Pa), está en función de la densidad del gas ρ_a (Kg/m³), su velocidad v_i (m/s) y el número de cabezas de velocidad a la entrada del ciclón N_h . A una $\Delta P < 2488.16$ Pa se obtienen costos bajos de operación del ciclón (Dirgo y Leith, 1985). A partir de la Ecuación 5, se calculó la ΔP tanto para el ciclón tipo Stairmand con entrada rectangular y circular, con valores de 454.28 Pa y 181.71 Pa, respectivamente. También se evaluó el modelo Lapple para una entrada rectangular y también para una circular con ΔP de 567.85 y 283.92 Pa, respectivamente (Apéndice 4-B). Las diferencias observadas entre ΔP se debe a la forma de la entrada al ciclón. A partir de estos resultados se determinó que una entrada circular favorecía una menor ΔP y con ello se reducían las pérdidas de energía. De manera complementaria, se calculó la η para ciclones con entradas rectangulares y circulares, y se encontró que generalmente los ciclones con entradas rectangulares presentaban una $\Delta\eta = -5$ % respecto a los ciclones de entrada circular (Apéndice 4-C). Por lo tanto, se decidió utilizar una configuración de entrada circular.

- **Cálculo de la eficiencia teórica del ciclón.** En el Apéndice 4-C se muestran los resultados de la velocidad y caudal del aire a una temperatura de 85 °C y presión de 1 atm obtenidos para diseños de ciclones de los modelos Stairmand y Lapple. De manera adicional en el análisis, se incluyeron dos parámetros asociados con el tamaño de partícula, C y d_m , donde C es un parámetro que involucra el caudal, la densidad de la partícula, la viscosidad del aire y las dimensiones del ciclón; mientras que d_m es el diámetro promedio de la masa. La relación $C*d_m$ vs $\ln\sigma_m$, a partir de un nomograma, permite calcular la eficiencia del ciclón (Anexo D-1 y D-2). σ_m es la desviación estándar del diámetro de partículas. Los valores de $C*d_m$ obtenidos para los modelos de ciclón Stairmand y Lapple fueron de 0.14 y 0.23,

respectivamente; mientras que la $\sigma_m = 5.42 \mu\text{m}$. Por lo tanto, polvos $d_p = 5 \mu\text{m}$ arrojan eficiencias del 67.5 % y 66.5 % para los modelos Stairmand y Lapple, respectivamente, Apéndice 4-C. Estos resultados permitieron seleccionar el modelo de ciclón Lapple, debido a que presenta una menor re-suspensión de partículas $v_i/v_{sa} = 2.60$.

4.2. Construcción y ensamblaje

4.2.1. Componentes de vidrio. Estos componentes constituyen la cámara donde se lleva a cabo el manejo de materia y el ciclón en el cual se recuperan los polvos obtenidos de la cámara. De inmediato se detallan estas dos piezas.

Cámara de secado (Figura 37). En esta cámara se lleva a cabo el proceso de secado y las condiciones de su operación se fijaron en un flujo de aire secante de 9000 L/h, una temperatura máxima de aire secante $T_{ai} = 135 \text{ }^\circ\text{C}$ y una $P = 1 \text{ bar}$, con un flujo de alimentación de 1.5 g/mL, asperjado a una presión de 2.5 bar.

La cámara de secado se construyó en los talleres de la empresa EVELSA, en la ciudad de Puebla. La cámara se construyó en vidrio de borosilicato con las dimensiones siguientes: altura de 35 cm, diámetro 8.5 cm y un grosor de 5 mm. La parte inferior de la cámara está constituida de una sección cónica. La cámara tiene dos salidas, una inferior y una lateral, y ambas están esmeriladas. La salida lateral conduce al ciclón y la inferior a un colector de polvos. Estas salidas esmeriladas facilitan las uniones y evitan pérdidas de polvos. La parte inferior de la cámara se une a un matraz bola que sirve de colector.

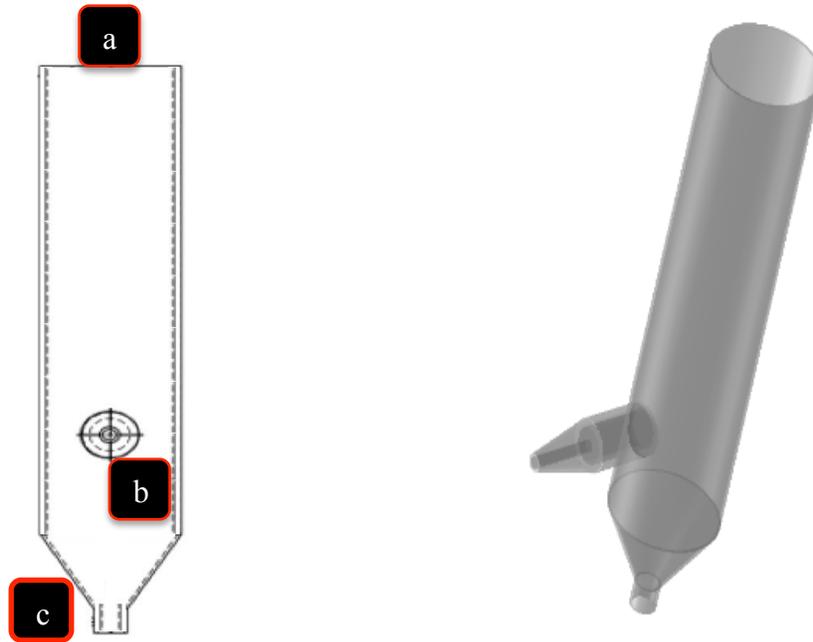


Figura 37. Cámara de secado. La entrada de los flujos de alimentación y de aire secante (a); salida de los polvos + aire y empalme con el ciclón (b); salida de polvos (c)

El ciclón (Figura 38) tiene la función de recuperar los polvos de tamaño de partícula de 5 a 25 μm , producidos en la cámara de secado. El ciclón se compone de una extensión en la parte superior que embona con el cuerpo de la cámara de secado. En la parte superior se diseñó un buscador de vórtices que genera 2 corrientes de aire, uno de forma descendente cuya función es depositar los polvos, y el otro en forma ascendente para retirar el aire limpio.

El buscador de vórtices se compone de 2 partes: una que está dentro del ciclón y la otra que se encuentra en la parte exterior que expulsa al aire libre de polvos. La parte inferior del ciclón cuenta con un esmerilado para conectar a un matraz bola. Para su fácil limpieza esta pieza se desarma en dos partes como se aprecia en la Figura 38.

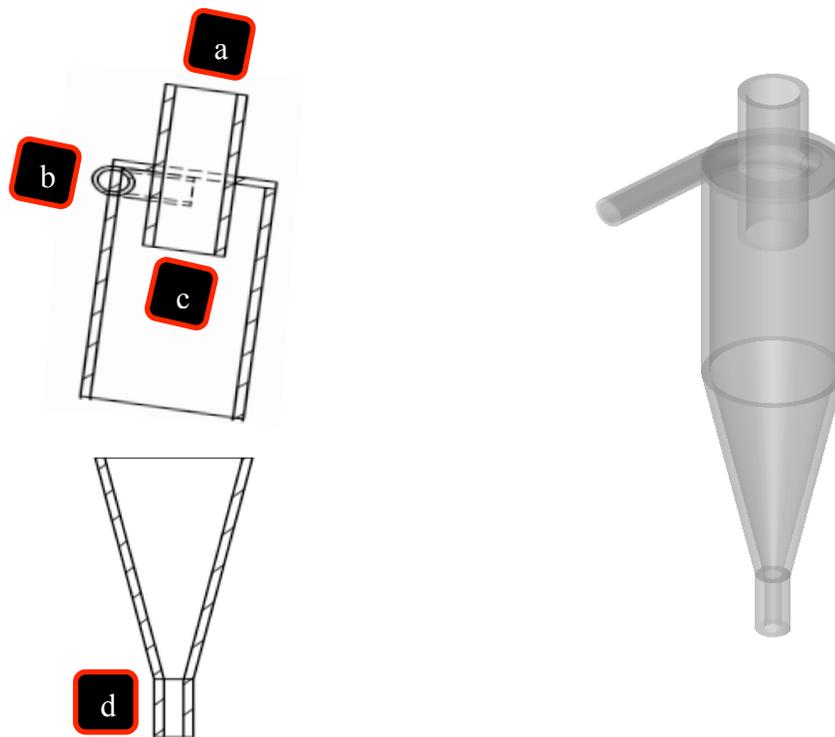


Figura 38. Ciclón colector. Salida del aire limpio y buscador del vórtices externo (a); entrada del aire + polvo y empalme con la cámara de secado (b); buscador de vórtices interno (c); salida de los polvos (d)

4.2.2. Componentes de acero inoxidable. Esta parte se compone de dos secciones. La primera es la cámara de calefacción, donde se suministra la energía necesaria al aire secante. También se utiliza como soporte de la boquilla. La segunda pieza es el disco difusor, que permite tener dirección de la trayectoria de las gotas y polvos dentro de la cámara de secado. A continuación se detallan estas dos piezas.

Cámara de calefacción (Figura 39). En esta cámara se realiza el calentamiento del aire secante que retirará humedad al producto. En esta estructura se coloca la boquilla tipo neumática marca *Buchi*. La cámara de calefacción cuenta con dos secciones: la primera es un tubo de acero inoxidable grado alimenticio de 45 cm de largo y 2.5 cm de diámetro, donde se colocan dos resistencias externas tipo abrazadera de 5.4 kW de potencia. La segunda sección son dos cilindros concéntricos unidos de manera permanente y colocada de manera perpendicular a la primera sección. El cilindro interno contiene a la boquilla y también permite el paso del aire secante caliente. La distancia entre los dos cilindros es de 5 mm y el espacio

entre los cilindros está relleno de caucho de silicón PE-21 marca Poliformas. La pared externa de esta sección se envolvió con fibra de vidrio, seguida de una recubierta de 3 mm de caucho de silicón PE-21. Después, se colocó otra capa de 8 mm de asbesto con 2.5 cm de colchoneta de vidrio, y para sujetar los aislantes se utilizó cinta de aluminio. Estos aislantes minimizaron las pérdidas de calor durante el traslado del aire secante desde la segunda sección de la cámara de calefacción hasta la cámara de secado.

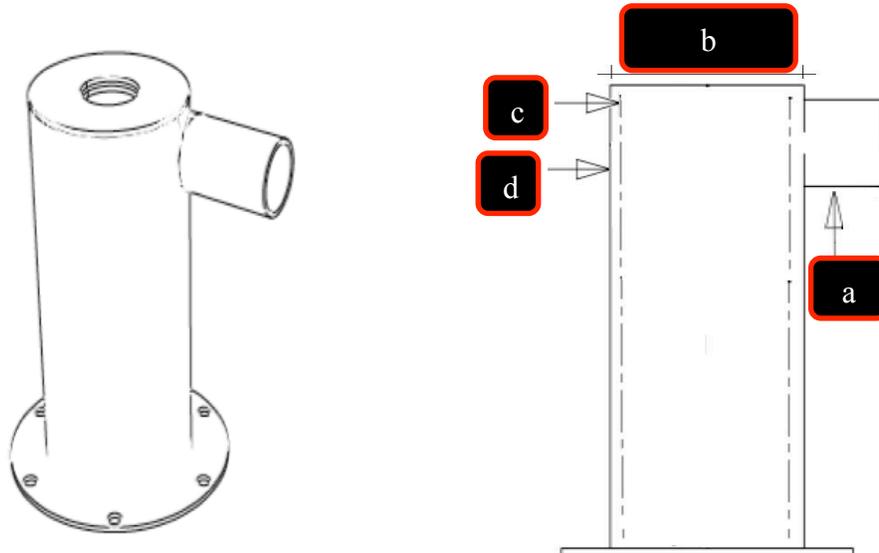


Figura 39. Cámara de calefacción. Primera sección (a); segunda sección (b); cilindro interno (c); cilindro externo (d)

Disco difusor (Figura 40). Este disco se utilizó para distribuir el aire secante dentro de la cámara de secado. El disco, al contener barrenos localizados estratégicamente en el centro del disco, influyó de manera significativa en la trayectoria de las partículas dentro de cámara de secado. Este disco difusor es de acero inoxidable grado alimenticio, cuenta con 63 barrenos: 31 de ellos son de 3 mm, otro número igual de barrenos de 1.5 mm y uno de 2.5 cm, y este último es el que permitió sostener la boquilla. Los 62 barrenos orientan la descarga del aire secante en dirección paralela a la pared de la cámara de secado. Esto indujo a una reorientación de las gotas descargadas desde la boquilla hacia el centro de la cámara de secado, reduciendo el contacto de los polvos con la pared de la cámara de secado.

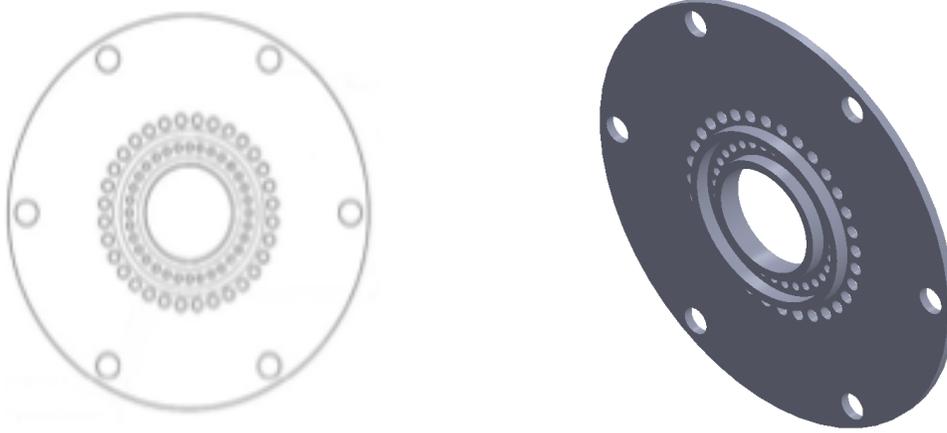


Figura 40. Disco distribuidor

4.2.3. Componentes del aislante (cerámico) y ensamblado de la cámara de calefacción. Los aislantes están compuestos de seis piezas. Las piezas 1 y 2 mostradas a la izquierda de la Figura 41, son las piezas internas y están en contacto con las resistencias tipo abrazadera. La función de estas dos piezas consiste en distribuir el calor de manera homogénea en el interior de la cámara de calefacción. Estas se envuelven con colchoneta de fibra de vidrio y posteriormente, encima de la colchoneta se colocan las piezas 4 y 5. Después, se colocan las tapas (pieza 3) circulares en los extremos de la fuente de calor. Finalmente, se recubren con cinta de aluminio para darle un acabado metálico. Todo lo anterior permitió aislar las resistencias calefactoras y así reducir tanto la pérdida de calor como la oxidación de las resistencias calefactoras. Los aislantes cerámicos permitieron tener un rendimiento del 50 % en el aprovechamiento del calor generado por las resistencias calefactoras. El rendimiento del aislante disminuye con respecto al tiempo de operación: Figura 41.



1 2 3 4 5

Figura 41. Componentes del sistema aislante

4.2.4. Ensamblado. En la Figura 42 se muestra el ensamblado completo del equipo. El componente 1 es la entrada de aire proveniente del compresor, que es medido por el medidor de flujo volumétrico (a), por medio de un sistema de control con un relevador (b). Este envía la señal a las resistencias calefactoras (c) para calentar el aire a la temperatura deseada. El componente 2 es la entrada de la alimentación. La alimentación se calienta y homogeniza con una placa de calentamiento y agitación (d). La alimentación caliente se traslada con la ayuda de una bomba peristáltica (e) a la boquilla neumática (f) a través de (2) para su atomización. El aire utilizado se descarga a través de la salida del ciclón (3) y el polvo es retenido en los colectores del ciclón tangencial (ct), originados en la cámara de secado (cs). El monitoreo de las temperaturas del aislante (cc) y del aire secante húmedo se realiza con un medidor de temperatura de dos termopares de sondas auto-adheribles (g).

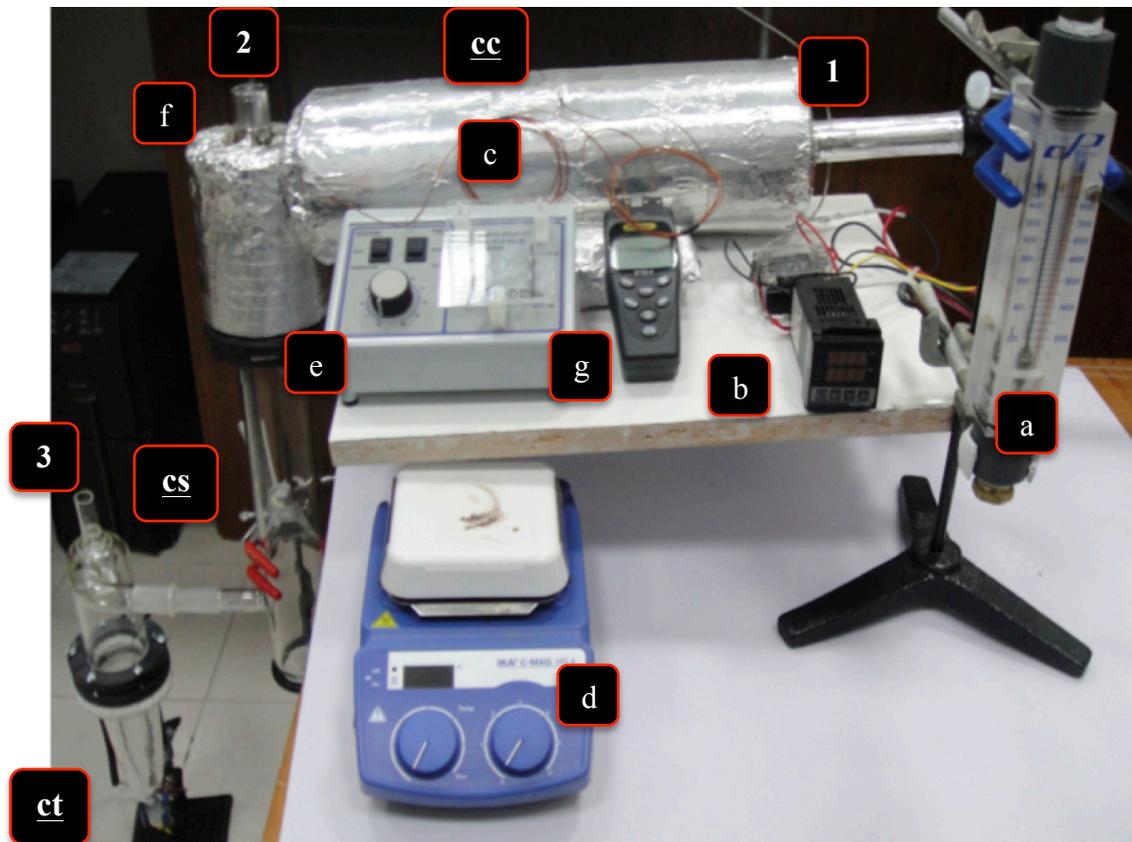


Figura 42. Componentes del secador por aspersión construido

4.3. Pruebas de secado

Para realizar las pruebas de secado del equipo, se utilizó jitomate rojo de acuerdo a la carta de color USDA. Para evaluar la calidad del secado se cuantificó el color de los polvos.

4.3.1. Humedad. Se consideró un contenido de humedad inicial del jitomate del 93 %, (Gómez-Gómez, 2009).

Para evaluar el efecto de la concentración de sólidos en el rendimiento de obtención de polvos, se utilizaron las condiciones iniciales de secado descritas en la Tabla 21. García-Gutiérrez *et al.*, (2005) mencionan que las humedades resultantes del proceso de secado de un alimento deben estar por debajo del 10 % de humedad, debido a que esto ayuda a prolongar la vida de anaquel del producto, lo cual reduce costos y facilita su traslado.

Tabla 21. Condiciones en la cámara de secado enchaquetada con una presión de 2.5 bar en la boquilla

Parámetro	Aire secante	Jugo de jitomate
Temperatura	135 °C	80 °C
Flujo	9000 L/h	1.5 g/min

Las humedades de los polvos de jitomate obtenidas se presentan en la siguiente Tabla 22. Donde el Jugo 1, corresponde a un filtrado y adición de maltodextrina en una relación 3.1:1 (maltodextrina : sólidos totales) para tener 14 % de sólidos. Mientras que el Jugo 2, es el resultado del producto del concentrado del Jugo 1 por medio de evaporación para alcanzar 23 % de sólidos.

Tabla 22. Humedad final del polvo obtenido en el secador por aspersión

Jugo de jitomate (polvo)	Humedad (%)	Temperatura de salida del aire secante (°C)
Jugo 1	4.99 ± 0.13	78.81 ± 2.7
Jugo 2	6.93 ± 0.03	89.5 ± 3.94

Un análisis comparativo de pares de medias mediante la prueba de *t-student* ($\alpha = 0.05$) de las humedades reportadas en la Tabla 22, permitió concluir que la concentración de sólidos en el jugo de jitomate afecta la humedad final de los polvos.

4.3.2. Color. Para evaluar la calidad del producto se escogió el color, debido a que el color tiende a oscurecerse tras haber sufrido un tratamiento térmico. Los resultados se presentan en la Tabla 23.

Tabla 23. Valores obtenidos por el UltraScan Vis Hunter Lab para la evaluación del color

	Jugo inicial	Jugo 1	Rehidratado del Jugo 1	Jugo 2	Rehidratado del Jugo 2
Sólidos secos	3.75	13.9	94.9	22.8	93.1
L	38.10± 0.15 ^a	40.88±0.18 ^{ab}	41.69±0.82 ^b	31.81±0.44 ^c	33.49±1.10 ^c
a*	31.56±0.07 ^a	33.00±0.19 ^a	24.35±0.29 ^b	37.00±0.06 ^c	25.73±1.11 ^d
b*	42.42±0.06 ^a	40.83±0.18 ^a	42.16±0.34 ^a	50.86±0.52 ^b	30.01±3.41 ^c
H	53.35±0.02 ^{oa}	51.05±0.05 ^{oab}	60.25± 1.51 ^{oc}	53.96 ±0.32 ^{oa}	49.39±1.91 ^{ob}
C	52.87±0.09 ^a	52.50±0.26 ^a	48.69±1.31 ^b	62.89±0.40 ^c	39.53±3.33 ^d

Jugo inicial, Jugo de jitomate sin maltodextrina. Jugo 1, Jugo de jitomate con un 14 % de sólidos, se obtuvo ese contenido de sólidos por adición de maltodextrina, en una relación 3.1:1 (maltodextrina: sólidos totales). Jugo 2. Jugo de jitomate con un 23 % de sólidos, se obtuvo por adición de maltodextrina, en una relación 3.1:1 (maltodextrina: sólidos totales), seguido de una evaporación a condiciones de ebullición a presión atmosférica. En las filas, los parámetros que no comparten una letra son significativamente diferentes a un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$.

Para determinar diferencias estadísticamente significativas en los parámetros de color L, a*, b*, C y H, se realizó un comparativo de medias por el “método de Tukey” en un intervalo de confianza del 95 %, Tabla 23. El análisis estadístico determinó que el uso de maltodextrinas, utilizadas para incrementar el contenido de sólidos totales en el jugo de jitomate no afectó ningún parámetro de color. En el caso del Jugo 1 y su producto rehidratado, el secado no modificó los parámetros L y b*, pero si los parámetros a*, H y C; esto se atribuye a la degradación de licopeno. Para el caso del Jugo 2 y el rehidratado de este jugo, el parámetro L no sufrió cambios por el secado. El parámetro b* se afectó por la evaporación lenta utilizada para concentrar los sólidos totales. Los otros parámetros tienen el mismo comportamiento que para el caso del Jugo 1. En la Figura 43 se aprecian los cambios de color que sufrió el Jugo 2.



Figura 43. Izquierda: Jugo 2, Centro: Polvos recolectados del jugo del Jugo 2 y Derecha: Jugo 2 rehidratado

4.3.3. Rendimiento. No existe un método teórico que permita el cálculo de la eficiencia (porcentaje de masa de partículas entrante que es separado por el ciclón) de forma exacta. Debido a que en la práctica partículas pequeñas que en teoría deberían salir con el gas no lo hacen debido a la aglomeración, al barrido o choque con partículas grandes. Estas partículas quedan depositadas en el colector, mientras que en el caso opuesto, partículas con mayor peso que deberían ser retenidas rebotan contra las paredes y son capturadas por la turbulencia ascendente, que, a su vez, promueve la expulsión de esas partículas del ciclón. Leith y Licht (1972) formularon un modelo que trata de adaptarse mejor al comportamiento experimental. Esta teoría predice las eficiencias de los diferentes diseños ciclónicos basándose en las propiedades físicas del material y del aire secante. Aplicando este modelo al ciclón propuesto en el presente proyecto, se determinó una eficiencia teórica de recuperación de polvos $\eta = 87.5 \%$, Anexo D-3. Sin embargo, este modelo no coincidió con los resultados obtenidos en el trabajo experimental. Por tal motivo, la eficiencia se determinó utilizando el modelo de Dietz, Anexo E, que se ajusta de manera más apropiada al modelo de ciclón Lapple, utilizado para el diseño del ciclón construido en el presente trabajo. El modelo de Dietz predijo una eficiencia $\eta = 66.5 \%$, Apéndice 4-C. Al determinar la eficiencia de recuperación de polvos experimentales a partir de pruebas con jugo de jitomate, con un contenido de sólidos totales del 23 % (Jugo 2), se encontró una $\eta = 62.5 \%$. Esta eficiencia es similar a la predicha por el modelo de Dietz. La pérdida de polvos se atribuye principalmente a la re-suspensión de sólidos en el ciclón, la cual no se logró abatir a pesar de haber escalado el ciclón al doble del tamaño sugerido por el modelo de ciclón Lapple, usado en este trabajo.

Adicionalmente, también se presentó el fenómeno de adherencia de polvos en la cámara de secado en todos los experimentos realizados. Esto se puede atribuir a la higroscopicidad de los azúcares de bajo peso molecular presentes en dicho producto Figura 44.

En relación a la aglomeración, esta no se presentó en el ciclón, pero en la cámara de secado se observó la presencia de aglomerados aislados. Esto último se produjo como resultado de un cambio en el ángulo de aspersión de la boquilla durante el montaje. Esto se puede corregir al colocar correctamente la boquilla en el disco distribuidor. También se puede disminuir la presión del aire de asperjado, pero no es recomendable debido que se aumenta el tamaño de la gota y se promueve la formación de un hilo de líquido que hidrata los polvos retenidos en los colectores de la cámara de secado y el ciclón.

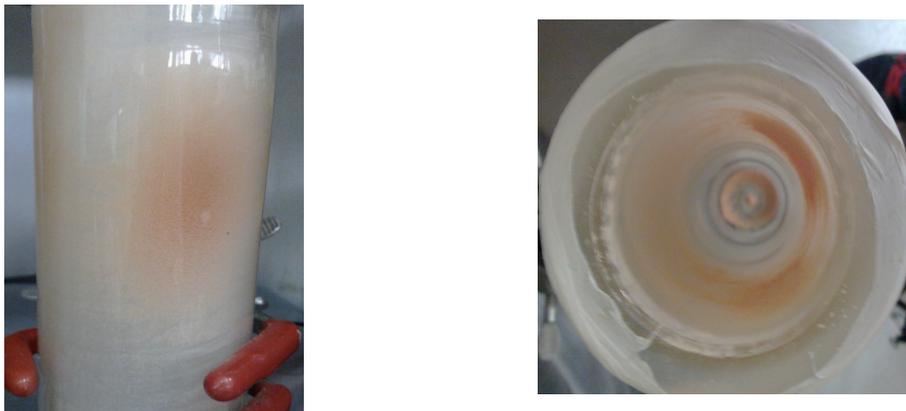


Figura 44. Aglomeración y adherencia en la cámara de secado

La eficiencia de recuperación de polvos de jitomate obtenidos a partir del Jugo 1 fue del 43.45 % con un diámetro promedio de partícula teórico (diámetro de Sauter) de 41.2 μm , Apéndice 5. Esta eficiencia fue superior en un 10 % a lo reportado por Goula y Adamopoulos (2004b) para un equipo que operó bajo condiciones similares de temperatura y humedad del aire secante, y con una concentración de sólidos totales en el jugo y diámetro de polvos teórico, también similares. Mientras que el Jugo 2 produjo polvos recuperados con un 62.45 % de rendimiento, que al compararse con el mismo estudio reportado por Goula y Adamopoulos (2004b) se obtuvo un rendimiento superior al 35 %, Anexo B. Las diferencias entre el Jugo 1 y Jugo 2 se deben al hecho de que al disminuir la viscosidad y la densidad del jugo, se tiene una distribución de partículas deficiente. Esto provoca que el ciclón no pueda retener a los

polvos y el aire arrastre a gran parte de los polvos hacia el exterior del ciclón. Por lo que en caso de realizar deshidratados de líquidos con contenidos bajos de sólidos (<20 %), se sugiere implementar una trampa o filtro a la salida del ciclón para recuperar esos polvos, Figura 45.



Figura 45. Polvos recolectados de experimento a 23 % de sólidos totales (Jugo 2)

4.3.4. Eficiencia térmica. La eficiencia máxima de retención de calor en la cámara de calefacción fue de un 65 % a un 35 % durante el tiempo que duró el deshidratado de jugo de jitomate, Figura 46. La pérdida de calor natural a través del aislante es del 14 %, Apéndice 2-C. La eficiencia puede aumentar significativamente si se coloca una colcha de fibra de vidrio sobre el cerámico para retener el calor de manera más eficiente.

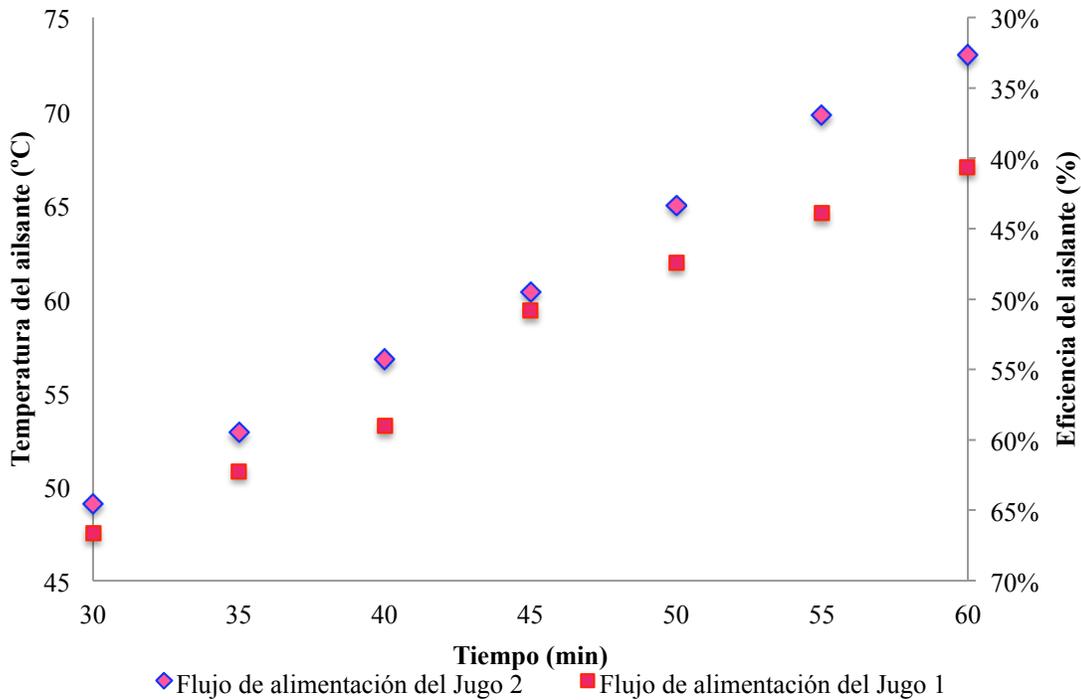


Figura 46. Relación de eficiencia del aislante y su temperatura en el proceso de secado de jugo de jitomate con un contenido de 14 (Jugo 1) y 23 % (Jugo 2) de sólidos totales

En la Figura 47 se muestra la curva y la ecuación que representan el comportamiento de la temperatura en la superficie del aislante (cerámico) de la cámara de calefacción en experimentos realizados sin suministro de asperjado.

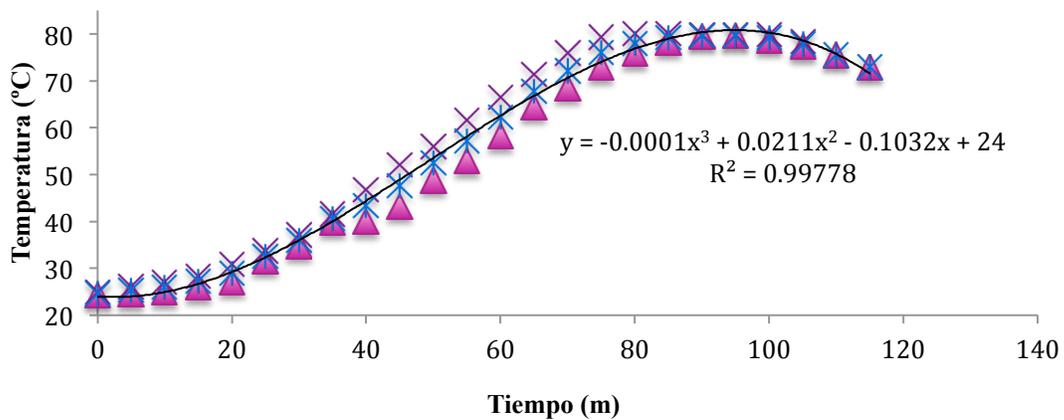


Figura 47. Pruebas del comportamiento del cerámico por 2 h

En la Figura 48 se muestra el incremento gradual de la temperatura del aislante en función del tiempo (de 0 a 30 min). Las resistencias calefactoras requirieron de 30 min para alcanzar la temperatura de operación de la cámara de secado (135 °C). Después de finalizar el experimento de secado y suspender el suministro de calor, se sigue liberando calor a través del aislante térmico durante 20 min. Desafortunadamente, ese calor remanente no se puede aprovechar, debido a que al suspender el suministro de calor la temperatura del aire secante en la entrada de la cámara de secado cae abruptamente hasta 100 °C.

La Figura 48 muestra el comportamiento del cerámico antes, durante y después del secado de los Jugos 1 y 2 (datos experimentales). Se realizó una regresión no lineal, obteniendo una ecuación cúbica para predecir la temperatura del cerámico en función del tiempo t (de 0 a 2 h) de operación, $T = -0.0001t^3 + 0.0231t^2 - 0.2265t + 20$. Con esta ecuación se puede estimar el tiempo que tardan las resistencias en alcanzar la temperatura de operación

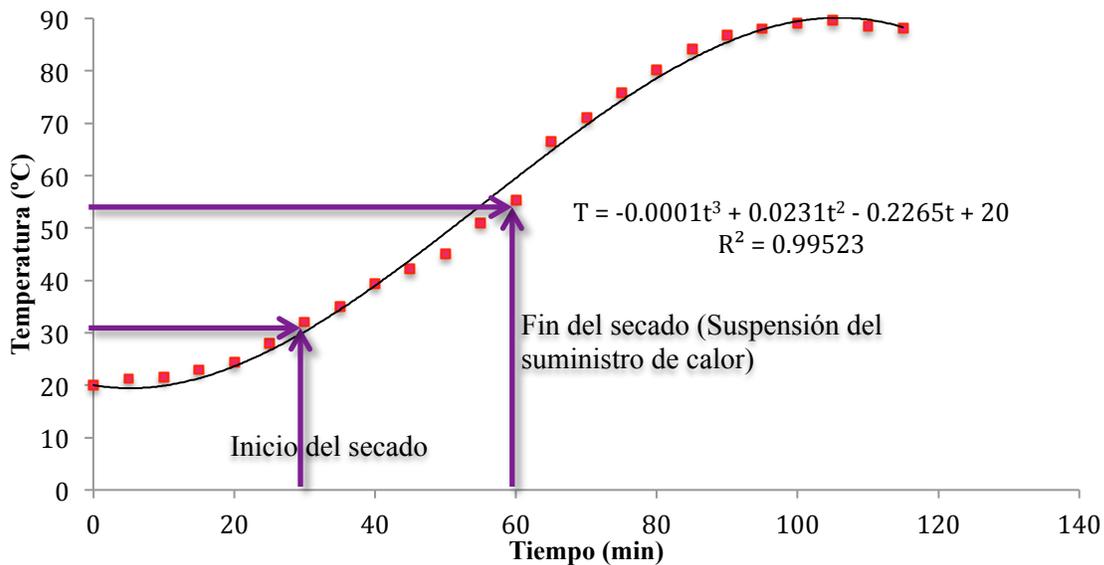


Figura 48. Comportamiento del cerámico en el secado tras haber realizado las corridas al Jugo 1 y Jugo 2

La evaluación del rendimiento del secador por aspersión se determinó a través de la eficiencias de evaporación, η_{evap} y térmica global, $\eta_{térmica}$, cuyos resultados fueron de 35 - 60 % y 47 - 54 % (Figura 49 y 50) respectivamente, eficiencias muy similares para el equipo sin

deshumidificación por Goula y Adamopolous (2004b) Anexo B. Estas eficiencias bajas indican que es necesario incorporar un deshumidificador de aire antes de introducir el aire secante a la cámara de calefacción para obtener eficiencias térmicas entre el 65 y 77 % como lo lograron Goula y Adamopolous (2004b) Anexo B.

Esto permitiría retirar una mayor cantidad de humedad del aire e incrementar la transferencia de masa desde las gotas asperjadas al aire secante en la cámara de secado. Al analizar el comportamiento de las eficiencias del aislante térmico, Figura 46, y la eficiencia de evaporación, Figura 49, se puede apreciar que existe una mayor demanda de energía al deshidratar el Jugo de jitomate con un contenido de sólidos del 23 % que cuando lo hacemos con el jugo de jitomate con un contenido de sólidos del 14 %. Esto se debe a que los jugos con un 23 % de sólidos tienen un mayor contenido de agua ligada a los sólidos y consecuentemente, se presenta una lenta evaporación del agua y una mayor temperatura del aire a la salida de la cámara de secado. Esto afecta de manera importante la eficiencia térmica global, Figura 50.

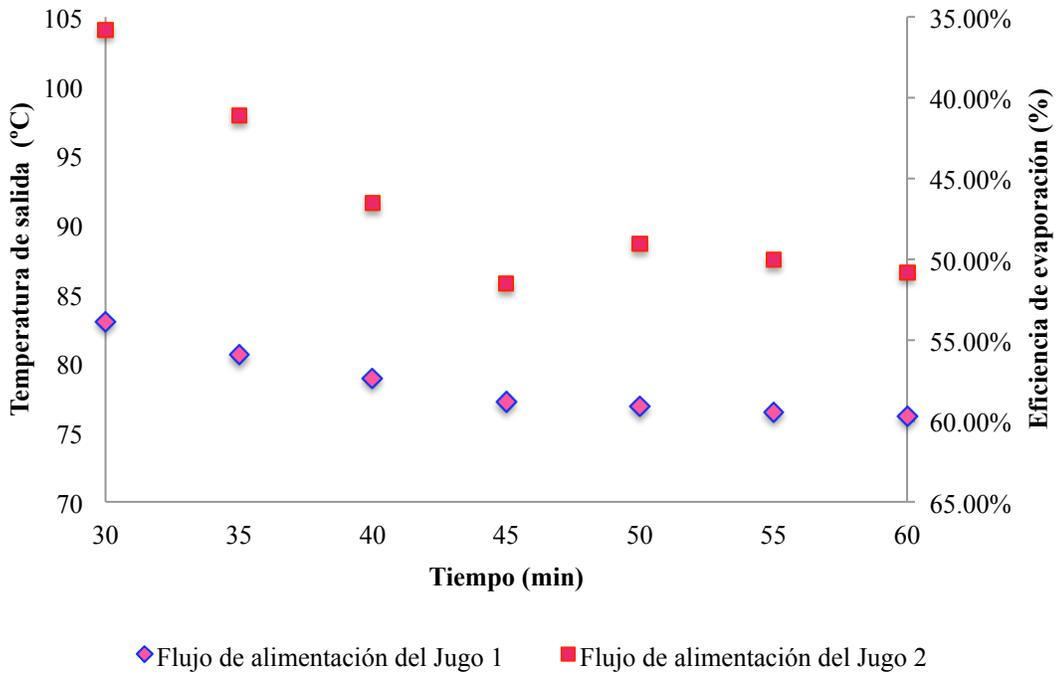


Figura 49. Relación de eficiencia evaporación y temperatura de salida en el proceso de secado del Jugo 1 y Jugo 2

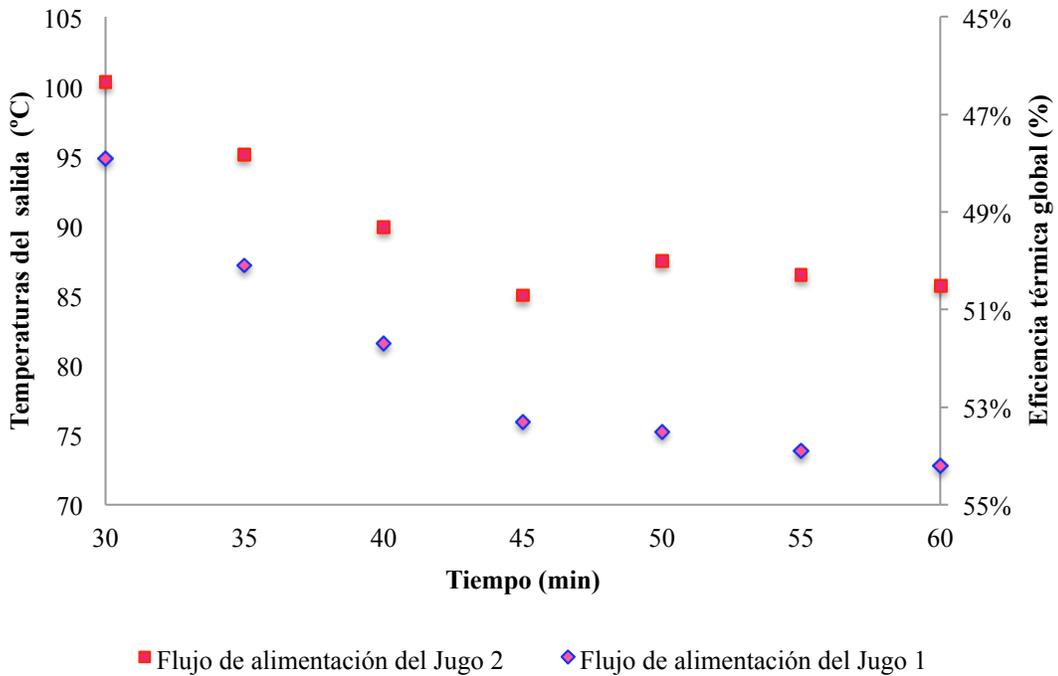


Figura 50. Relación de eficiencia térmica global y temperatura de salida en el proceso de secado del Jugo 1 y Jugo 2

CONCLUSIONES

- El secador por aspersión diseñado y construido en este proyecto, se puede utilizar para deshidratar jugos de jitomate con un contenido de sólidos totales mayores a 20 % para obtener rendimientos de recuperación de polvos mayores a 50 %; si se desea secar otro alimento es pertinente realizar pruebas para observar el comportamiento del equipo y la evaluación de los polvos de obtenidos.
- Las maltodextrinas no alteraron el color del jugo de jitomate; se recomienda utilizarlas para incrementar el contenido de sólidos totales, en lugar de concentrar por evaporación. Este último método produce una pérdida considerable de licopeno.
- El equipo fue operado de manera satisfactoria para producir polvos de jitomate con flujos de aire secante de 9000 L/h, a una temperatura de 135 °C, una presión de 2.5 bar en la boquilla y un flujo de alimentación de 1.5 mL/min.
- El sistema de aislamiento otorga un máximo de uso del equipo de 1.5 h continuas, con eficiencias térmicas de entre 50 y 40 %.
- El costo del equipo es menor al costo de un equipo comercial de tres a cinco veces (Apéndice 6).
- El uso de arcillas refractarias combinado con colchón de fibra de vidrio en la cámara de calefacción, trae consigo un ahorro de energía al otorgar una eficiencia del 50 al 60 %.
- Una alimentación de jugos con mayor contenido de sólidos o viscosidad produce rendimientos de obtención de polvos superiores al 50 %
- Los polvos producidos presentaron una humedad del 5 - 7 %, valores que están por debajo del 10 % de los reportados en la literatura.

PERSPECTIVAS

Como perspectivas para este trabajo, se proponen los siguientes puntos que tienen la finalidad de incrementar la eficiencia y automatizar el equipo de secado por aspersión.

- Automatizar el equipo.
 - Realizar simulaciones computacionales para conocer la mejor distribución de las partículas, el mezclado aire-atomización, colisión y suspensión de las partículas.
- Utilizar un deshumidificador para controlar la humedad del aire entrante al sistema.
- Realizar pruebas en el nivel de nano-estructuras para conocer la calidad del producto:
 - Porosidad del polvo
 - Punto de pegado
 - Aglomeración
 - Higroscopicidad.
- Realizar pruebas fisicoquímicas cuya finalidad sea demostrar la calidad del polvo; por ejemplo, la cuantificación de vitamina C, licopeno y compuestos fenólicos.

REFERENCIAS

- Badui D, S. (2006). *Química de los alimentos* (4 ed.). México: Pearson.
- Bahamondes-Santos, J. L. (2008). Diseño y construcción de un separador ciclónico para la industria naval. *Tesis*. Valdivia, Chile: Universidad Austral de Chile.
- Barbosa-Cánovas, G. V., y Vega-Mercado, H. (2000). *Deshidratación de alimentos*. (A. Ibarz-Ribas, Trans.) Zaragoza, España: Acribia S.A.
- Boonloi, A., y Promvongse, P. (2006). "Kinetic of pepper corns in a fluidized-bed with helical distributor plate". *The 2nd Joint International Conference on "Sustainable Energy and Environment"*, (pp. 1-4). Bangkok.
- Candelas-Cadillo, M G; Alanís-Guzmán, M G. J; Bautista-Justo, M; Del Río-Olague, F; García-Díaz, C. (2005). "Contenido de licopeno en jugo de jitomate por aspersión". *AMIDIQ*, 4, 299-307.
- Candelas-Cadillo, M G; Alanís-Guzmán, M G. J; Bautista-Justo, M; García-Díaz, C; Del Río-Olague, F. (2006). "Cuantificación de licopeno y otros carotenoides en jitomate y polvo de jitomate". *REDALYC*, 10 (19), 1-12.
- Chen, X. D., y Mujumdar, A. S. (2008). *Drying Technologies in Food Processing* (1 ed.). Estados Unidos: Blackwell Publishing LTD.
- Choi, Y. y Okos, M.R. (1986). Effects of temperature and compositions on the thermal properties of foods. In: *Food engineering and process application. Vol I. Transport phenomena*. Le Maguer, M. and Jelen, P. (eds). Elsevier Applied Science Co., Inc. New York. pp. 93-101.
- Cengel, Y. A., y Boles, M. A. (2003). *Termodinámica* (4 ed.). México: Mc Graw-Hill.
- CIELAB. (1971). *Colorimetry Oficial Recommendations of the Internacional Comision on Ilimination*. Paris: Publication CIE No 15.
- Cortés, R. M., y Chiralt, A. (2008). "Cinética de los cambios de color en manzana deshidratada por aire fortificada con vitamina E". *Revista de la facultad de química farmacéutica*, 15 (1), 8 -16.
- Díaz-Santiago, y Barenche, R. O. (2005). *Acondicionamiento térmico de edificios*. Argentina: Nabuko.
- Dirgo, J., y Leith, D. (1985). "Cyclone collection efficiency: comparison of experimental results with theoretical predictions". *Aerosol science and Technology*, 401-415.

- Doymaz, Í. (2007). "Air-drying characteristics of tomatoes". *Journal of Food Engineering*, **78** (4), 1291-1297.
- Economopoulou, A. A., y Economopoulos, A. P. (2002). "Rapid performance evaluation and optimal sizing of dry cyclone separators". *Journal of Environment Engineering*, **128** (3), 275 - 285.
- García-Gutiérrez, C., González-Maldonado M. B., Ochoa-Martínez L. A., Medrano-Roldán H. (2004). "Microencapsulación de jugo de cebada verde mediante secado por aspersión". *Ciencia y Tecnología Alimentaria*, **4** (4), 262-266.
- García-Sánchez, J. A. (2008). Efectos de la variación del dimensionamiento del buscador de vortices en el desempeño de un separador ciclónico. *Tesis*. México: Instituto Politecnico Nacional.
- Geankoplis, C. J. (1998). *Procesos de transporte y operaciones unitarias* (3ed.). México: CECSA.
- Goula, A. M., y Adamopoulos, K. G. (2003). "Spray drying performance of a laboratory spray dryer for tomato powder preparation". *Drying Technology*, **21** (7), 1273-1289.
- Goula, A. M., y Adamopoulos, K. G. (2004a). "Influence of spray drying conditions on tomato powder properties". *Drying Technology*, **22** (5), 1129-1151.
- Goula, A. M., y Adamopoulos, K. G. (2004b). "Spray drying of tomato pulp: effect of feed concentration". *Drying Technology*, **22** (10), 2309-2330.
- Goula, A. M., y Adamopoulos, K. G. (2008). "Effect of Maltodextrin Addition during Spray Drying of Tomato Pulp in Dehumidified Air: II. Powder Properties". *Drying Technology*, **26** (6), 726-737.
- Gómez-Gómez, M. S. (2009). Deshidratación de jitomate saladette en un secador de charolas giratorias. *Tesis*. Huajuapán de León, México: Universidad Tecnología de la Mixteca.
- Gutiérrez-Torres, C., Barbosa-Saldaña, J. G., Jiménez-Bernal, J. A., y Quinto-Diez, P. (2006). "Estudio de los parámetros que afectan la eficiencia de separación de los separadores tipo ciclón". *REDALYC*, **10** (2), 59-63.
- Holman, J. P. (1999). *Transferecna de calor* (10 ed.). México, México: Mc-Grall Hill.
- Hougen, O. A., Watson, K. M., y Ragatz, R. A. (2006). *Principios de los procesos Quimicos I. Balances de materia y energía*. Barcelona, España: Reverté.
- Ibarz, A., y Barbosa-Cánovas, G. V. (2005). *Operaciones unitarias en la ingeniería de alimentos*. México, México: Mundi-Prensa.
- Jiménez, J. A., Gutierrez, C., Barbosa, J. G., y Moreno, L. A. (2008). "Patrones de Flujo en un Sistema de Separación Ciclónico". *Información Tecnológica*, **19** (1), 29-36.
- Kalen, B., y Zenz, F. A. (1974). "Theoretical-empirical approach to saltation velocity in cyclone desing". *Aerosol Science and Technology*, **12**, 598-606.

- Kern, D. Q. (2000). *Procesos de transferencia de calor*. México, México: CECSA.
- Langrish, T. A. (2007). "New engineered particles from spray dryers: Research needs in spray drying". *Drying Technology*, **25**, 981-993.
- López-Hernández, O. D., y Martínez -Álvarez, L. O., (2010). "Herramientas para el diseño de las condiciones del proceso de secado por aspersión de extractos vegetales para uso farmacéutico". *Revista Cubana de Plantas Medicinales*, **15**(3) 152-156.
- López-Hernández, O. D., Muñoz-Cernada, A., Carmona-Fernández, R., Torres-Amaro, L., y Gónzales-Sanabria, M. L. (2006). "Influencia del uso de aditivos sobre el rendimiento del proceso de secado por aspersión de extracto acuoso de Calendula Officinalis L". *Revista Cubana plantas medicinales*, **11** (1).
- Masters, K. (1991). *The spray drying Handbook*. New York: Longman Scientific Publication.
- Maupoey, P. F., Andrés Grau, A. M., Barat Baviera, J. M., y Albors Sorolla, A. M. (2001). *Introducción al secado de alimentos por aire caliente*. Valencia, España: U.P.V.
- Mazza G. M. G., Brandão B. L. E. y Wildhagen S. G., (2003). "Characterization of the residue time distribution in spray dryers". *Drying Technology*. **21** (3), 525 - 538.
- McCabe, W. L., Smith, J. C., y Harriot, P. (1998). *Operaciones unitarias en ingeniería química* (4 ed.). Madrid, España: McGraw-Hill.
- Mendoza-Galicia, N., Romo-López, T., y Serratos-Castañeda, I. (2003). Diseño y Construcción de un Secador por Aspersión. *Tesis*. México: Instituto Politecnico Nacional.
- Necati, M. y Özisik, (1993). *Heat conduction*, John Wiley & Sons, Inc, New York, cap. 14
- Norma Mexicana NMX-F-83-1986. *Determinación de humedad en productos alimenticios*. Dirección general de normas.
- Oti, B. P., y Aztell, B. (1998). *Técnicas de secado. Intermediate Technology Development Group*. Lima, Perú. United Nations Development Fund for Women vol. **1**. 67 pp.
- Ozmen, L y Langrish, T. A. G. (2003). "A study of limitations to spray dryer outlet performance". *Drying Technology*, **21** (5), 895 - 917.
- Perry, R. H., Green, D. W., y Maloney, J. O. (1996). *Perry del manual del ingeniero químico* (3 ed.). Madrid, España: McGraw-Hill.
- Pisecky, J. (1997). *Handbook of Milk Powder Manufacture*. Niro A/S.
- Rahman. S. (1995). *Food Properties handbook*. Florida: CREC Press, Inc.
- Ré, M. I. (1998). "Microencapsulation by Spray Drying". *Drying Technology*, **16** (6), 1995-1236.

- Roos, Y. y Karel, M. (1991). "Water and molecular weight effects on glass transitions in amorphous carbohydrates and carbohydrate solutions". *Journal of Food Science*, **56** (6), 1676-1681.
- Schwartzbach, C., y Masters, K. (2001). "Performance of spray dryer with integrated filter and fluid bed". *Drying Technology*, **19** (8), 1909 -1923.
- Sánchez, M. T., y Pineda, I. (2003). *Procesos de elaboración de alimentos y bebidas*. Madrid, España: Mundi-Prensa.
- Shi, J. X., Le-Maguer, M., Kakuda, Y., y Y Liptay, A. (1999). "Stability of lycopene in tomato products during dehydration." *Institute of Food Technologists Annual meeting*, 79D -42. University of Guelph. Guelph, Ontario, Canada.
- Smiths, A. J. (2003). *Mecánica de fluidos. Una Introducción física*. México: Alfaomega.
- Singh, R. P., y Heldman, D. R. (2009). *Introducción a la ingeniería de los alimentos* (2 ed.). Zaragoza, España: Acribia.
- Southwell, D. B., Langrish, T. A., y Fletcher, D. F. (2001). "Use of computational fluid dynamics techniques to assess design alternatives for the plenum chamber of a small spray dryer". *Drying Technology*, **19** (2), 257-268.
- Ulrich, K. T., y Eppinger, S. D. (2004). *Diseño y desarrollo de productos. enfoque multidisciplinario*. México, México: McGraw-Hill Interamericana.
- Villareal-Jiménez L.A. (2004). Usos de lodo de papel y arena silice para la fabricación de ladrillos y tabla roca. *Tesis*. Puebla, México: Universidad de las Américas Puebla.
- Yanza-Hurtado, E. G. (2003). Diseño de un secador por atomización a nivel piloto para jugo concentrado de tomate de árbol. *Tesis*. Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Walpole R. E., (1999). *Probabilidad y estadística para ingenieros*. (6 ed). México, México: Prentice-Hall hispanoamericana, S. A.
- Zbicinski, I., Strumillo, C., & Delag, A. (2002). "Drying kinetics and particle residence". *Drying Technology*, **20** (9), 1751-1768.

PÁGINAS DE INTERNET

Arpagaus, C., y Schwartzbach, H. (2008). *Scale-up from bench-top research to laboratory production*. www.buchi.com. Accesada el 9/Agsoto/2011.

Buchi-Labortechnik, A. G. (2010). *Process Mini Spray Dryer B-290—Efficient and safe Spray Drying of aqueous and organic solutions*. www.buchi.com. Accesada el 9/Agsoto/2011.

IMSA. (2002). *Productos derivados del maíz. Glosario de términos*. www.imsa.com.mx Accesada el 12/noviembre/2010.

Rodríguez-Hernández, G. R., y Ruiz-Cabrera, M. A. (2004). "El secado por aspersión y secado osmótico: procesos alternativos para la obtención de nuevos productos a partir de la tuna". *Premio Nacional* 35.

Schick R. J. and Spraying Systems Co. (2008). *Spray technology reference guide understanding drop size*. "Spray analysis and research services". URL: http://service.spray.com/lit/view_lit.asp?code=B459C. Accesada la imagen el 20/Nov/2011

URL: http://rayosxadomicilio.mex.tl/232818_Que-son-los-Rayos-X.html. Accesada la imagen el 9/enero/2013

URL: <http://aprende.colorotate.org/color-models.html>. Accesada la imagen el 9/enero/2013

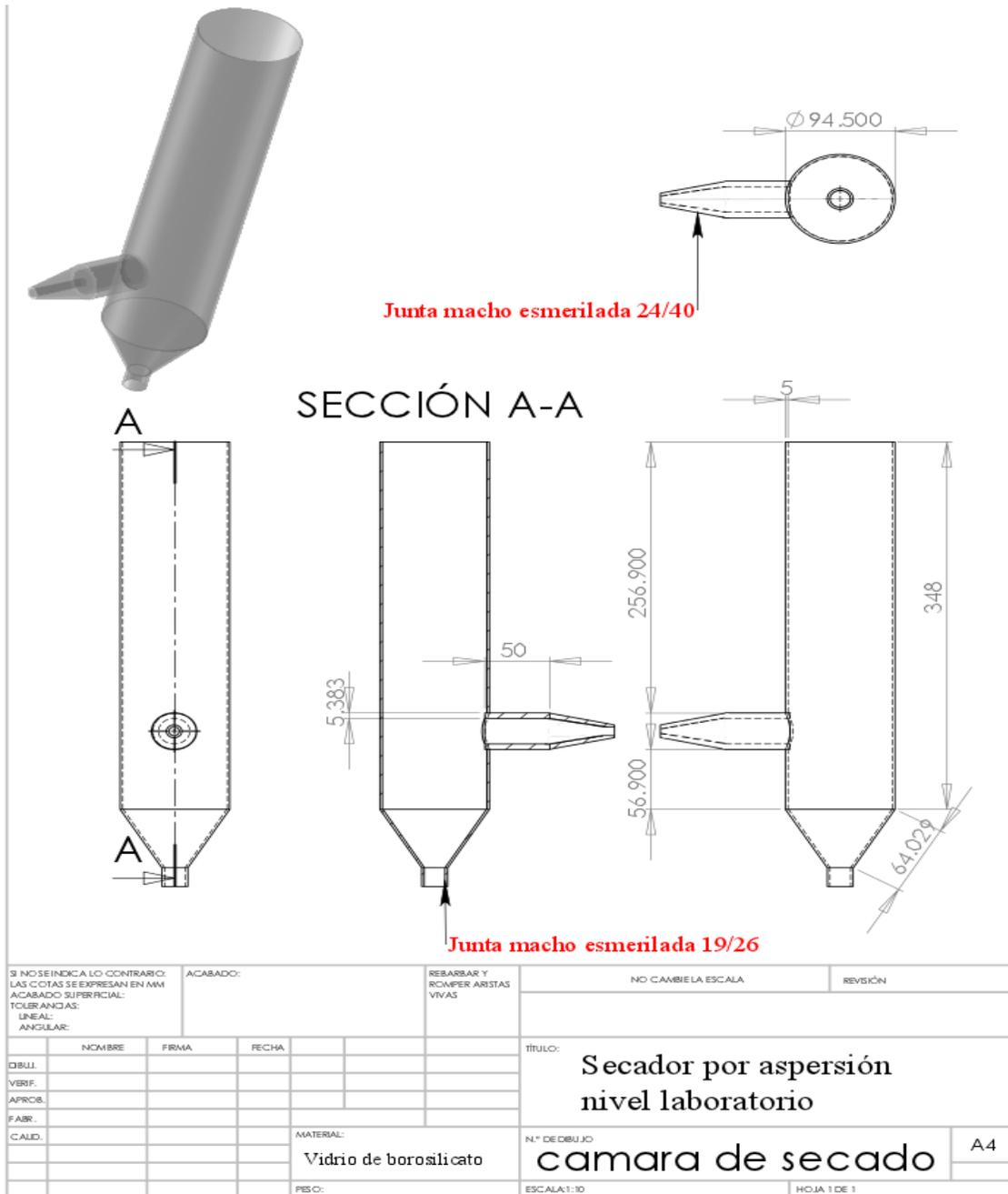
URL: <http://www.proyectacolor.cl/aplicacion-del-color/modelos-de-color/modelo-cie/>. Accesada la imagen el 9/enero/2013

URL: <http://www.miliarium.com/Prontuario/Tablas/Quimica/PropiedadesTermicas.asp>. Accesada la imsgen el 4/enero/2013

URL: http://www.texsa.com/es/productos_general.asp?id=tecsound_ft_55_al. Accesada la imagen el 4/enero/2013

APÉNDICE 1-A

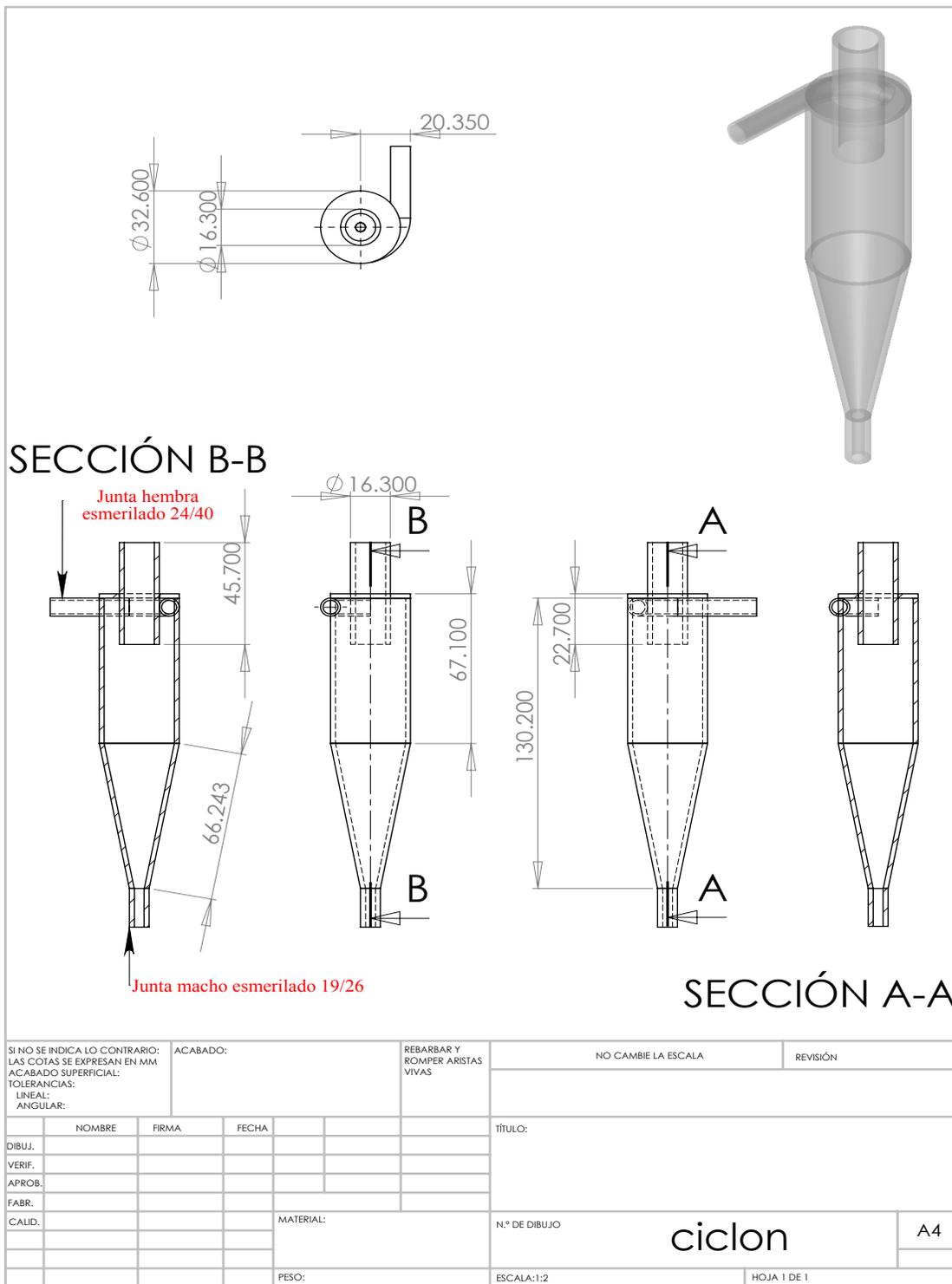
PLANO DE LA CÁMARA DE SECADO DE VIDRIO DE BOROSILICATO ^{a)}



a) El diseño se realizó, primero utilizando el programa Autocad 2013 para generar los 2D, para posteriormente utilizar SolidsWork 2012 y crear el plano en 3D.

APÉNDICE 1-B

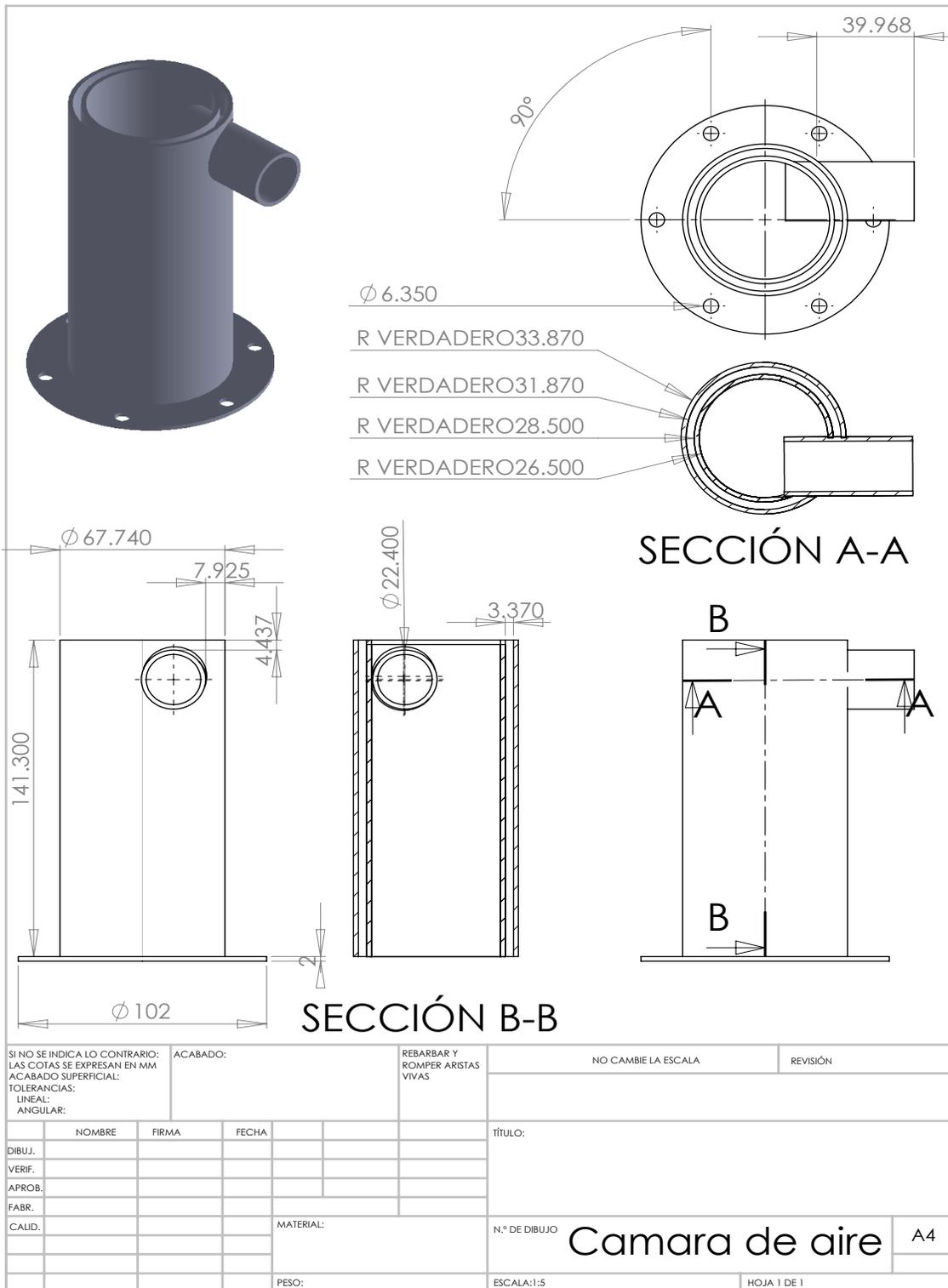
PLANOS DEL CICLÓN TANGENCIAL DE VIDRIO DE BOROSILICATO ^{a)}



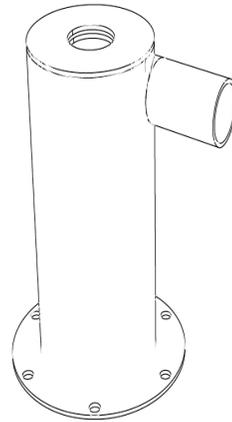
a) El diseño se realizó, primero utilizando el programa Autocad 2013 para generar los 2D, para posteriormente utilizar SolidsWork 2012 y crear el plano en 3D.

APÉNDICE 1-C

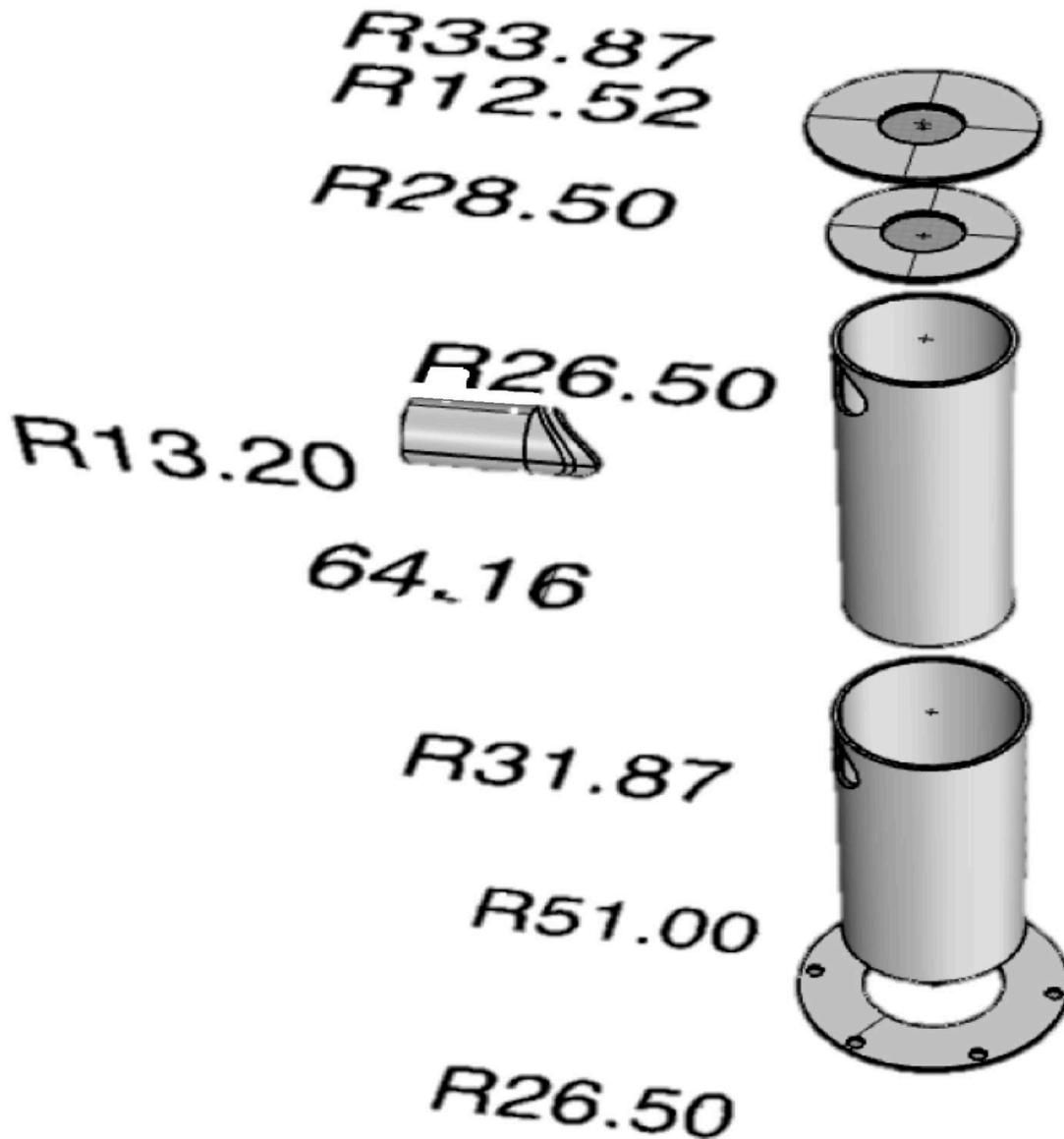
PLANO DE LA CÁMARA DE CALEFACCIÓN DE ACERO INOXIDABLE a)



a) El diseño se realizó, primero utilizando el programa Autocad 2013 para generar los 2D, para posteriormente utilizar SolidsWork 2012 y crear el plano en 3D.

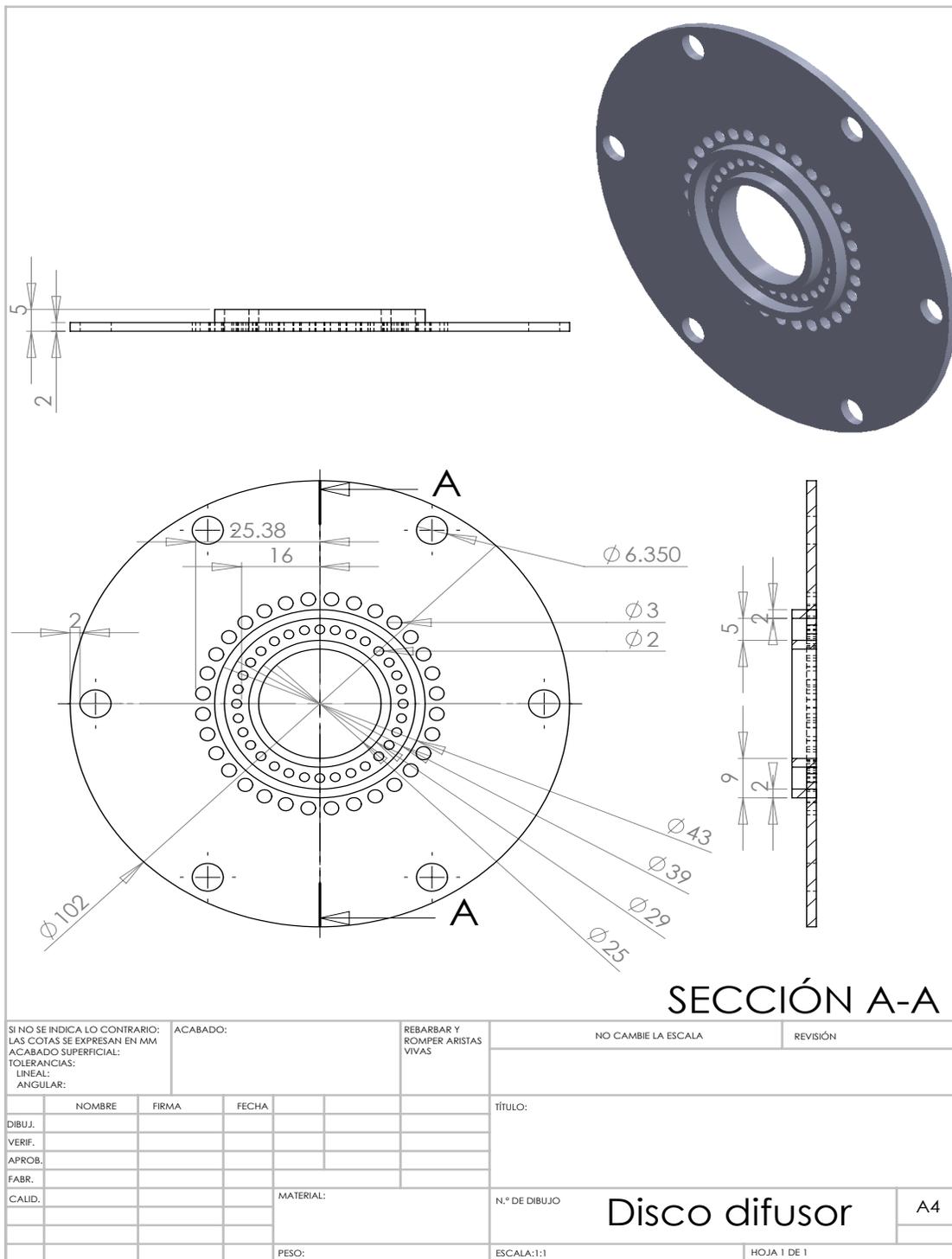


Explosión del plano de la cámara de calefacción de acero inoxidable utilizando el programa Rhino 4.0



APÉNDICE 1-D

PLANO DEL DISCO DIFUSOR DE ACERO INOXIDABLE ^{a)}



a) El diseño se realizó, primero utilizando el programa Autocad 2013 para generar los 2D, para posteriormente utilizar SolidsWork 2012 y crear el plano en 3D.

APÉNDICE 2-A

BALANCE DE MATERIA Y ENERGÍA

Balance general de materia

$$S_s X_{si} + G_a Y_{ai} = S_s X_{so} + G_a Y_{ao}$$

Balance parcial

$$S_s \cdot (X_{si} - X_{so}) = G_a \cdot (Y_{ao} - Y_{ai})$$

Se toman los valores conocidos y se re-estructura la ecuación con las dos incógnitas

$$G_a \frac{Kg\ ss}{h} \cdot \left(Y_{ao} - 0.011 \frac{Kg\ agua}{Kg\ ss} \right) = 0.198 \frac{Kg\ ss}{h} \cdot \left(3.54 \frac{Kg\ agua}{Kg\ ss} - 0.075 \frac{Kg\ agua}{Kg\ ss} \right)$$

Balance general de energía

$$G_a \cdot (H_{ai} - H_{ao}) = S_s \cdot (h_{so} - h_{si})$$

A continuación se desglosa cada entalpia para poder sustituir valores conocidos e igualar la ecuación de energía y materia y tener una incógnita

Entalpias del aire

$$C_{sai} = \{Cp_a + Cp_v Y_{ai}\} \cdot (T_{ai} - T_0)$$

$$C_{sao} = \{Cp_a + Cp_v Y_{ao}\} \cdot (T_{ao} - T_0)$$

$$H_{ai} = C_{sai} + \lambda_0 Y_{ai}$$

$$H_{ao} = C_{sao} + \lambda_0 Y_{ao}$$

Entalpia del jugo

$$h_{si} = Cp_{si} \cdot (T_{si} - T_0) + X_{si}Cp_{H_2O} \cdot (T_{si} - T_0)$$

$$h_{so} = Cp_{so} \cdot (T_{so} - T_0) + X_{so}Cp_{H_2O} \cdot (T_{so} - T_0)$$

Se sustituyen los valores conocidos e igualamos la ecuación de materia con dos incógnitas con la de ecuación de energía, para obtener la expresión siguiente.

$$Y_{ao} = \frac{\{H_{ai} - Cp_a(T_{ai} - T_0)\} \cdot (X_{si} - X_{so}) + Y_{ai}(h_{s0} - h_{si})}{h_{s2} - h_{si} + \{Cp_v(T_{ao} - T_0) + \lambda_0\} \cdot (X_{si} - X_{so})}$$

Una vez obtenido el valor de la humedad se sustituye en la ecuación de balance de materia, y así se obtiene el flujo de aire. Después, se obtienen los valores de energía, que posteriormente se utilizaron para la determinación de la potencia de las resistencias calefactoras. El resumen de las especificaciones técnicas de las resistencias calefactoras se muestra en la tabla siguiente.

Características y condiciones de operación de las resistencias calefactoras tipo banda mica marca Marpe

Operación	Cantidad	Operación	Cantidad
Voltaje	220 V	Temperatura máxima	150 °C
Tamaño	30 x 2.5 cm	Tiempo de operación	120 min
Flujo de aire máximo	55 Kg/h	Potencia	2.5 kW

APÉNDICE 2-B

DETERMINACIÓN DEL CP DEL JUGO ($C_{p_{si}}$) Y POLVO DE JITOMATE ($C_{p_{so}}$)

Componente	C_p^a	Jugo de jitomate al 23 % de ST		C_p^a	Polvo de jitomate al 95 % de ST		
		fracción del componente ^a	$C_{p_{si}}$ (kJ/KgK)		fracción del componente ^a	$C_{p_{so}}$ (kJ/KgK)	
Proteína	2.28	0.014	0.032	2.27	0.060	0.135	
Grasa	1.77	0.001	0.002	1.89	0.004	0.008	
Carbohidratos	1.35	0.07	0.094	1.48	0.302	0.437	
Fibra	1.81	0.011	0.020	1.90	0.048	0.088	
Cenizas	1.24	0.007	0.009	1.29	0.030	0.038	
Maltodextrina	1.35	0.117	0.157	1.48	0.505	0.731	
Agua	2	0.98	1.956	2	0.05	0.100	
		Total	2.27			Total	1.54

^a Anexo F

$$C_{p_{so}} = 1537.3 \text{ J/Kg}_{ss}\text{K}$$

$$C_{p_{si}} = 2270.1 \text{ J/Kg}_{ss}\text{K}$$

APÉNDICE 2-C

PÉRDIDAS DE CALOR EN EL AISLAMIENTO DE LA CÁMARA DE CALEFACCIÓN

$$q = \frac{\Delta T \cdot \pi}{\frac{1}{h_i \cdot d_i} + \frac{1}{h_o \cdot d_o} + \frac{\text{Ln}(d_o/d_i)}{2 \cdot \lambda}}$$

Dónde:

- q = Pérdida de calor por metro de tubería (W/m)
d = Diámetro del aislamiento (m)
h = Coeficiente superficial de transmisión de calor W/m²K
λ = Coeficiente de conductividad (W/mK)
ΔT = Diferencia entre temperaturas ambiente y del aislante (°C)

Resultados de la pérdida de calor desde el aislante de la cámara de calefacción al ambiente

Temperatura del aislante (°C)	q, T _a (26.5 °C)	Temperatura del aislante (°C)	q, T _a (20.9 °C)
49.1	-12.48	45.1	-13.37
52.9	-14.58	51	-16.63
56.8	-16.74	55.4	-19.06
60.4	-18.73	66.4	-25.14
65	-21.27	71	-27.68
69.8	-23.92	75.8	-30.33
73	-25.69	80.2	-32.76
Pérdida de calor en 30 min, durante el secado del Jugo 1, -133.41 W/m		Pérdida de calor en 30 min, durante el secado del Jugo 2, -164.96 W/m	
Promedio de pérdida de calor en los 35 cm del tubo que transporta el aire secante en la cámara de calefacción = -52.21 W			

Considerando que la distancia del tubo donde se localizan las resistencias tiene una longitud de 0.35 m, se tiene una pérdida de calor natural por el aislante de -52.21W.

La energía requerida por el secador es de 370 W. Por lo tanto el sistema calefactor requiere suministrar una energía de 370 W + 52.21 W = 422.21 W. Los 52.21 W corresponden a la energía que se disipa a través del aislante de forma natural al ambiente. La eficiencia teórica del sistema fue del 86 %.

APÉNDICE 3

TIEMPO DE RESIDENCIA

$$t = \frac{V_{ch}}{\dot{V}_a}$$

Cálculo del volumen de la cámara

$$V = \frac{\pi}{4} d^2 h$$

$$h = 35 \text{ cm}, d = 8.6 \text{ cm}$$

$$V = 2033.08 \text{ cm}^3 = 2.03 \text{ L} = 2.03 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$V = \frac{\pi}{12} h (d_1^2 + d_1 \cdot d_2 + d_2^2)$$

$$h = 6.4 \text{ cm}$$

$$d_1 = 8.5 \text{ cm}$$

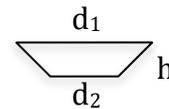
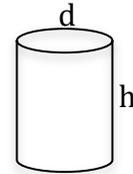
$$d_2 = 1.5 \text{ cm}$$

$$V = 149.13 \text{ cm}^3 = 0.149 \text{ L} = 1.49 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$V_{ch} = 2.18 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$\dot{V}_a = 2.5 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$t = 2.18 \times 10^{-3} \text{ m}^3 / (2.5 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}) = \mathbf{0.87 \text{ s}}$$



APÉNDICE 4-A
DIMENSIONAMIENTO DEL CICLÓN

	Unidad	Entrada del ciclón con configuración			
		Stairmand		Lapple	
		Rectangular	Circular	Rectangular	Circular
Velocidad del aire	m/s	12	12	12	12
Flujo del aire	m ³ /s	0.0025	0.0025	0.0025	0.0025
Área del ducto de entrada	m ²	0.0002	0.0002	0.0002	<i>0.0002</i>
Ancho de entrada al ciclón = a	m	0.0228	0.0081	0.0204	<i>0.0081</i>
Ancho de entrada al ciclón = b	m	0.0091	0.0081	0.0102	<i>0.0081</i>
Altura de salida = F	m	0.0228	0.0204	0.0259	<i>0.0207</i>
Diámetro del ciclón = d _c	m	0.0456	0.0407	0.0408	<i>0.0326</i>
Diámetro de salida del ciclón = d _o	m	0.0228	0.0204	0.0204	<i>0.0163</i>
Altura de la parte cilíndrica del ciclón = h	m	0.0685	0.0611	0.0816	<i>0.0651</i>
Altura de la parte cónica del ciclón = z	m	0.1141	0.1018	0.0816	<i>0.0651</i>
Altura total del ciclón = I	m	0.1826	0.1629	0.1633	<i>0.1303</i>
Diámetro de la salida del polvo = B	m	0.0171	0.0153	0.0102	<i>0.0081</i>

APÉNDICE 4-B
CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL CICLÓN

Unidad		Entrada del ciclón con configuración			
		Stairmand		Lapple	
		Rectangular	Circular	Rectangular	Circular
Presión	bar	1	1	1	<i>1</i>
Temperatura	°C	85	85	85	<i>85</i>
Viscosidad aire	Kg/ms	2.13E-05	2.13E-05	2.13E-05	<i>2.13E-05</i>
Densidad aire	Kg/m ³	0.98585	0.98585	0.98585	<i>0.98585</i>
Densidad partícula	Kg/m ³	160	160	160	<i>160</i>
Velocidad equivalente	m/s	0.3571	0.3571	0.3571	<i>0.3571</i>
Velocidad de saltación	m/s	4.2314	4.1974	4.6918	<i>4.6214</i>
v_i/v_s		2.84	2.86	2.56	2.60
Longitud natural del ciclón	m	0.11	0.14	0.09	<i>0.09</i>
Volumen del ciclón en salida	m ³	3.20E-07	8.10E-08	2.60E-07	<i>5.26E-08</i>
Numero de cabezas de velocidad a la entrada del ciclón		6.4	2.56	8	<i>4</i>
Caída de presión	Pa	454.28	181.71	567.85	283.92
Tiempo de relajación	s	1.04E-07	1.04E-07	1.04E-07	<i>1.04E-07</i>
Exponente del vórtice		0.4	0.4	0.4	0.4
Número de giros		5.5	13.75	6	<i>12</i>

APÉNDICE 4-C
EFICIENCIA DEL CICLÓN

Entrada del ciclón con configuración					
Unidad	Stairmand		Lapple		
	Rectangular	Circular	Rectangular	Circular	
<i>Eficiencia Dietz D-1 y D-2</i>					
In σ		2.015	2.015	2.015	<i>2.015</i>
d_m	μm	5	5	5	<i>5</i>
C		0.017	0.03	0.019	<i>0.029</i>
Cd_p		0.09	0.15	0.10	<i>0.15</i>
<i>Uso de nomograma</i>	<i>%</i>	<i>62</i>	<i>67.5</i>	<i>63</i>	<i>66.5</i>
<i>Eficiencia Leith y Licht Anexo D-3</i>					
N		0.7176	0.7214	0.7213	<i>0.7289</i>
y		0.3935	0.3861	0.3863	<i>0.3720</i>
G		868.90	5153.70	562.59	<i>2204.98</i>
K_c		0.6890	0.2459	0.7905	<i>0.6132</i>
V_s		1.40E-05	1.59E-05	1.54E-05	<i>1.04E-05</i>
V_{nl}		1.03E-04	1.39E-06	7.67E-05	<i>2.16E-05</i>
d	m	0.0288	0.0167	0.0265	<i>0.0139</i>
A		0.219	0.466	0.209	<i>0.432</i>
Ad_m^N		1.07	1.84	1.03	<i>1.75</i>
$NLn\sigma$		1.21	1.22	1.22	<i>1.23</i>
d_p	μm	5	5	5	<i>5</i>
<i>Uso de nomograma</i>	<i>%</i>	<i>77</i>	<i>88.5</i>	<i>77</i>	<i>87.5</i>

Los diámetros de partícula, d_p , reportados para una boquilla neumática son de 20 a 250 μm , Chen & Mujumdar (2008). El porcentaje de polvos colectados por la cámara de secado están entre 10 y 50 %, Pisecky, (1997). Goula y Adamopoulos (2008), reportaron valores de d_p entre 15 y 85 μm , con un diámetro de Sauter de 42 μm , para jugo de jitomate con maltodextrina a flujos de 1.75 g/min y presión de atomización de 2.5 bar.

APÉNDICE 5

CÁLCULO DEL DIÁMETRO PROMEDIO

$$D_{3,2} = 1920 \left(\frac{\sqrt{\alpha}}{v_{ai} \sqrt{\rho}} \right) + 597 \left(\frac{\mu}{\sqrt{\mu * \rho}} \right)^{0,45} * \left(1000 \frac{Q_f}{Q_{ai}} \right)^{1,5}$$

$$Q_1 = 1.5 \text{ mL/min} = 2.5E-8 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\rho_1 = 0.97 \text{ g/mL (Ecuación obtenida de la gráfica Apéndice 5 a temperatura 125°C)}$$

$$Q_{ai} = 1.5 \text{ mL/min} = 2.5E-8 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\mu_1 = 90.32 \text{ Poise (Anexo F)}$$

$$\alpha_a = 47.14 \text{ dinas/cm (Anexo G)}$$

$$v_a = 9000 \text{ L/h} = (2.5E-3 \text{ m}^3/\text{s} * 5.62 \text{ m}^2) = 4.46 \text{ E-4 m/s}$$

$$\mathbf{D_{3,2} = 41.21 \mu m}$$

Calculo del área

$$A_1/V_1 = A_2/V_2$$

Velocidad V_1

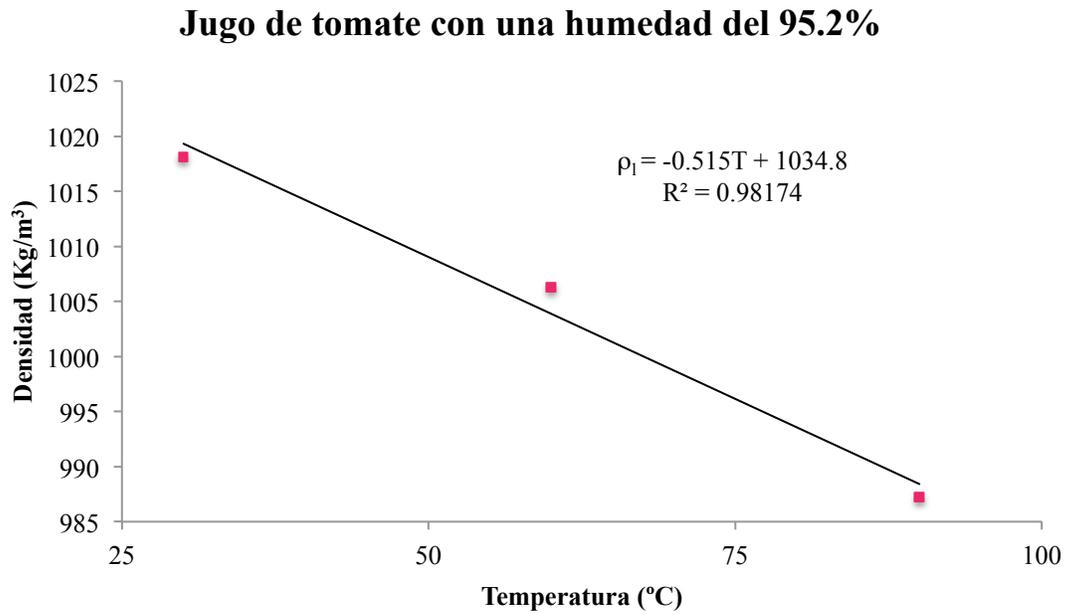
A_1 = al área de la boquilla punta de la boquilla con diámetro de 0.7 mm.

$$A_1 = 3.85E-4 \text{ m}^2$$

$$V_1 = Q_a / A_1 = (2.22E-3 \text{ m}^3/\text{s}) / 3.85E-4 \text{ m}^2 = 84077.14$$

A_2 = al área de la cámara con diámetro de 84.5 mm.

$$V_2 = \left(A_2 / A_1 / V_1 \right) = 84077.14 \text{ m/s}$$



La gráfica se obtuvo a partir del Anexo F de las condiciones físicas del jugo de jitomate

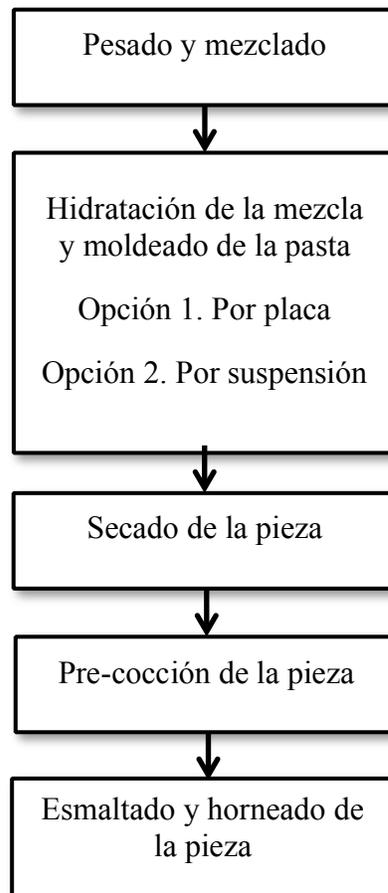
APÉNDICE 6

El costo de fabricación del equipo es de tres a cinco veces menor comparado con secadores por aspersión comerciales. Estos últimos oscilan en el orden de \$200,000.00 a \$300,000.00 M.N.

Accesorios	Precio U M.N
Cámara y ciclón (<i>accesorios de vidrio</i>)	\$15,000.00
Boquilla de atomización	\$24,500.00
Resistencias con controlador y termopar	\$3,500.00
Láminas de acero inoxidable de 70 x 60 cm.	\$500.00
Mangueras de alta presión, insertos y barriles, tuercas y niples (<i>sistema de aire</i>)	\$ 728.00
Arcilla refractaria, rollo de fibra de vidrio 30 m, cinta de aluminio, caucho y asbesto (<i>sistema aislante</i>)	\$ 1746.55
Termopares de cinta adherente, medidor de aire, monitor digital de temperatura dual, medidor de aire, regulador de presión, manómetro, con una tasa de tipo de cambio de \$13.94 (<i>sistema de medición</i>)	\$ 6,661.05
Accesorios diversos	\$ 345.55
	Sub-total
	\$ 52,981.15
	I.V.A (16 %)
	\$ 8,476.98
	Total
	\$ 61,458.13

APÉNDICE 7

Diagrama de flujo de elaboración del aislante de cerámica en el laboratorio



ANEXO A

**CONDICIONES DE OPERACIÓN REPORTADAS PARA DIFERENTES
ATOMIZADORES (Chen y Mujumdar, 2008)**

Atomizador	<i>Rotatorio</i>	<i>Vortex</i>	<i>Fluido doble</i>
Viscosidad	Alimentos de baja viscosidad 1.50 a 32.0 cP (leche, cerveza)	Alimentos de viscosidad intermedia 90.0 y 3.0 x 10 ³ cP (aceite y salsa de jitomate)	Alimentos de alta viscosidad 7.6 x 10 ³ a 4.0 x 10 ⁵ cP (pasta de jitomate y mantequilla de cacahuete)
Diseño	Disco con o sin canales	0.3 – 0.4 mm tobera con o sin turbulencia	Tobera con entrada de doble fluido (aire/gas inerte) y líquido
Energía	Velocidad centrifuga (5000 – 20,000 rpm)	Presión: 10–60 kPa	Presión del aire: 1-3 kPa. Relación entre el aire y el líquido 10:1
Trayectoria de la gota	> 120°	5-140°	20-60°
Tamaño de partícula	30-120 µm	180-250 µm	20-250 µm
Ventajas	Control del tamaño de partícula fácil Alta capacidad	Partes inmóviles Simple	Manejo de la viscosidad Funciona con productos espesos y abrasivos
Desventajas	Trayectoria de la gota larga	Limitaciones con la viscosidad Sufre obstrucciones, desgaste, y rasgado	Para partículas muy finas es necesario una alimentación extra de aire
Consumo de energía	Intermedio	Bajo	Alto
Aplicación en general	Para alimentos	Para alimentos	Para productos químicos y alimentos
Uso	Escala industrial	Escala pequeña y mediana	Escala laboratorio

A partir de esta información se seleccionó la boquilla *Buchi* de doble fluido (neumática).

ANEXO B

CARACTERÍSTICAS DEL AIRE SECANTE Y CONTENIDO DE SÓLIDOS (DE 14 A 18 %) EN LA ALIMENTACIÓN Y SU EFECTO EN LOS POLVOS OBTENIDOS (Goula y Adamopoulos, (2004b))

Características del aire secante	Deshumidificado		No deshumidificado		
	140 °C	110 °C	140 °C	130 °C	110 °C
Temperatura del aire secante	140 °C	110 °C	140 °C	130 °C	110 °C
Producto recuperado (%)	62 – 65	46 – 52	17 – 10	31 – 25	22 – 18
Eficiencia térmica (%)	69 – 67	70 – 68	50 – 48	52 – 50	46 – 45
Eficiencia de evaporación (%)	77 – 75	74 – 73	55 – 53	52 – 47	55 – 53
Contenido de humedad (%)	4 – 3	10 – 8	4 – 3.5	4 – 3.5	11 – 10
Tamaño de partícula (µm)	29 – 30	45 – 47	45 – 47	35 – 38	50 – 55

Condiciones: presión de la boquilla neumática 5 bar, flujo de alimentación 1.75 g/min, flujo del aire a 140 °C de 17.50 m³/h y 130 °C de 22.75 m³/h

CARACTERÍSTICAS DEL AIRE SECANTE Y CONTENIDO DE SÓLIDOS (DE 18 A 22 %) EN LA ALIMENTACIÓN Y SU EFECTO EN LOS POLVOS OBTENIDOS (Goula y Adamopoulos, (2004b))

Características del aire secante	Deshumidificado		No deshumidificado		
	140 °C	110 °C	140 °C	130 °C	110 °C
Temperatura del aire secante	140 °C	110 °C	140 °C	130 °C	110 °C
Producto recuperado (%)	65 – 69	52 – 55	10 – 3	25 – 20	18 – 16
Eficiencia térmica (%)	67 – 66	68 – 67	48 – 46	50 – 48	45 – 42
Eficiencia de evaporación (%)	75 – 74	73 – 71	53 – 52	53 – 52	47 – 46
Contenido de humedad (%)	3 – 2	8 – 7	3,5 – 2	3,5 – 2	10 – 9.5
Tamaño de partícula (µm)	30 – 32	47 – 49	47 – 49	38 – 39	55 – 59

Condiciones: presión de la boquilla neumática 5 bar, flujo de alimentación 1.75 g/min, flujo del aire a 140 °C de 17.50 m³/h y 130 °C de 22.75 m³/h

ANEXO C

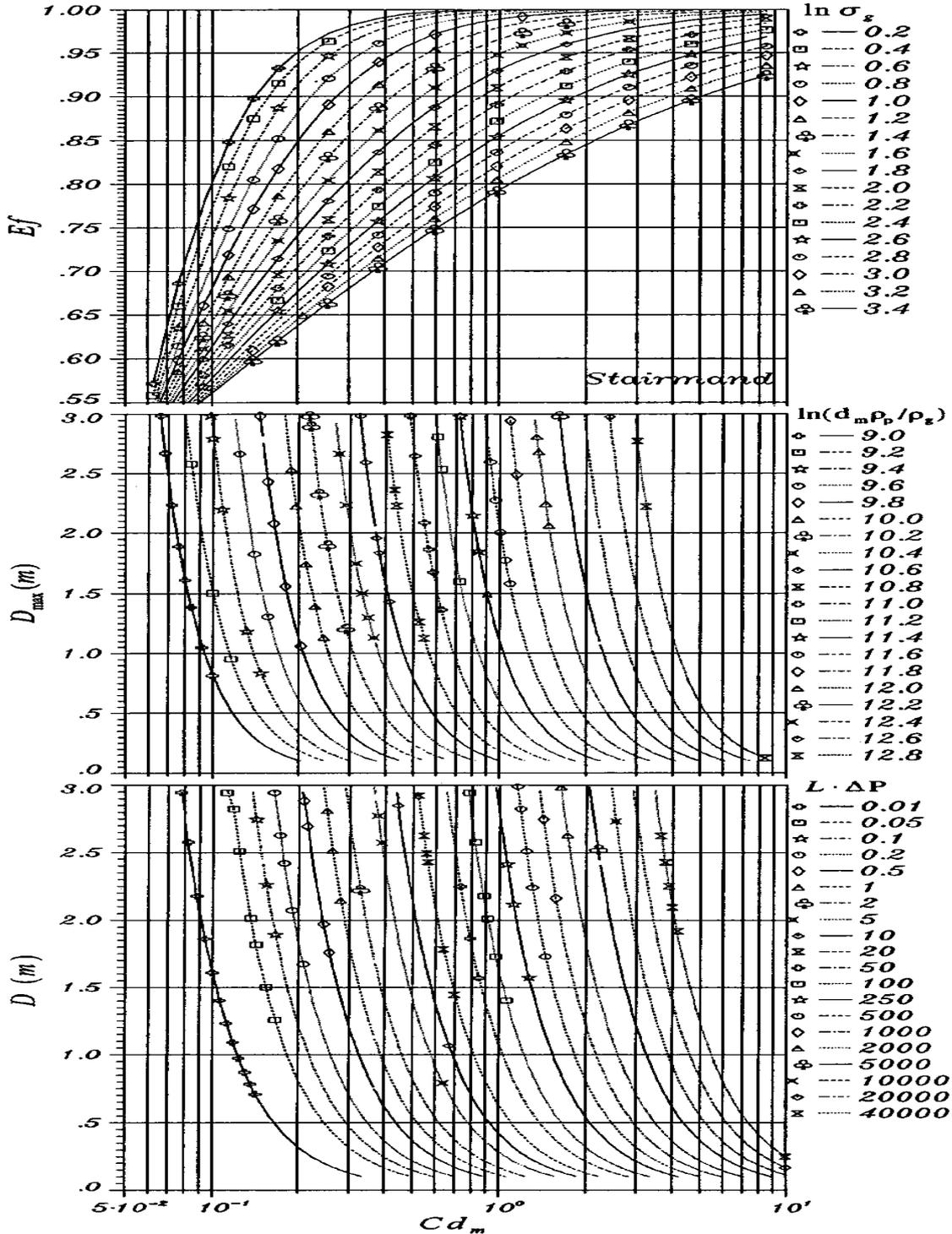
**PROPIEDADES FÍSICAS DEL AIRE A PRESIÓN ATMOSFÉRICA ESTÁNDAR
(UNIDADES SI)**

<i>Temperatura (°C)</i>	<i>Densidad¹ (Kg/m³)</i>	<i>Viscosidad dinámica¹ (N.s/m²)</i>	<i>Cp² (kJ/Kg.K)</i>
65.7	-	-	1.0090
80	0.9996	2.05 E-5	-
90	0.9721	2.14 E-5	-
100	0.9461	2.17 E -5	-
148.9	-	-	1.0174
200	0.7461	2.53 E -5	-

1 Smiths, A. J. (2003). 2 Geankoplis, C.J. (1998)

ANEXO D-1

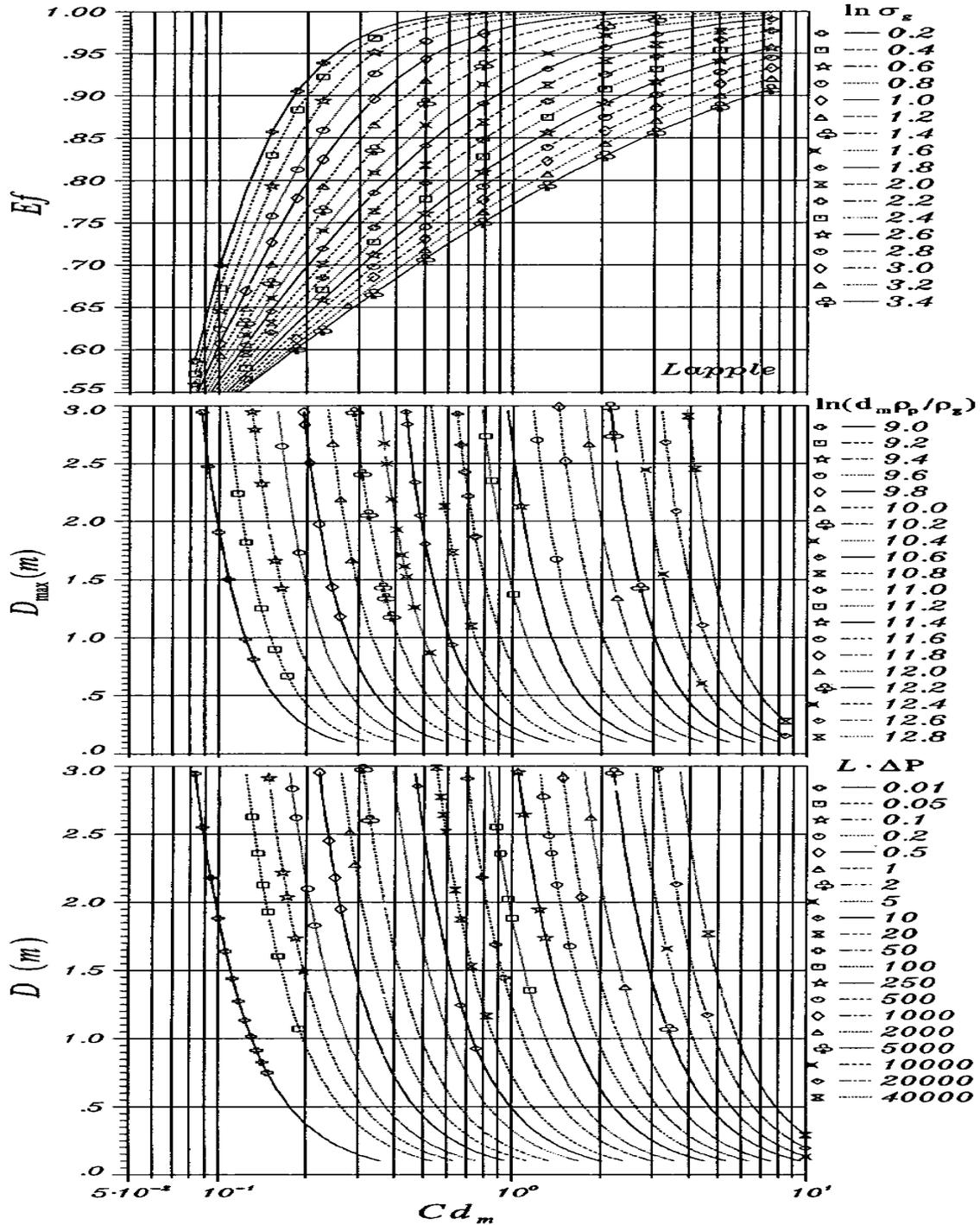
NOMOGRAMA PARA LA SIMULACIÓN Y DISEÑO DE CICLONES “STAIRMAND DE EFICIENCIA ALTA” CON CONFIGURACIÓN BASADA EN LA FORMULACIÓN DE DIETZ (Economopoulou y Economopoulos, (2002))



$E_f = \eta$

ANEXO D-2

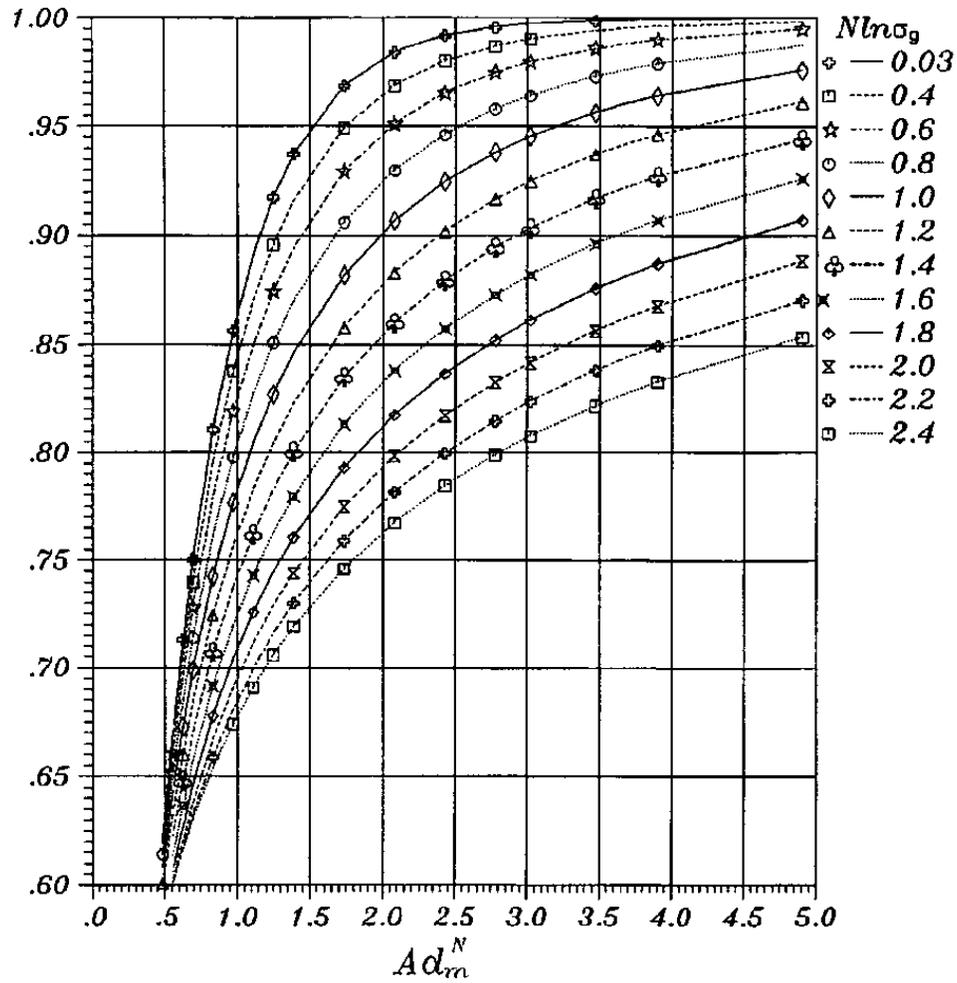
NOMOGRAMA PARA LA SIMULACIÓN Y DISEÑO DE CICLONES “LAPPLE O SWIFT CONVENCIONAL” CON CONFIGURACIÓN BASADA EN LA FORMULACIÓN DE DIETZ (Economopoulou y Economopoulos, (2002))



$E_f = \eta$

ANEXO D-3

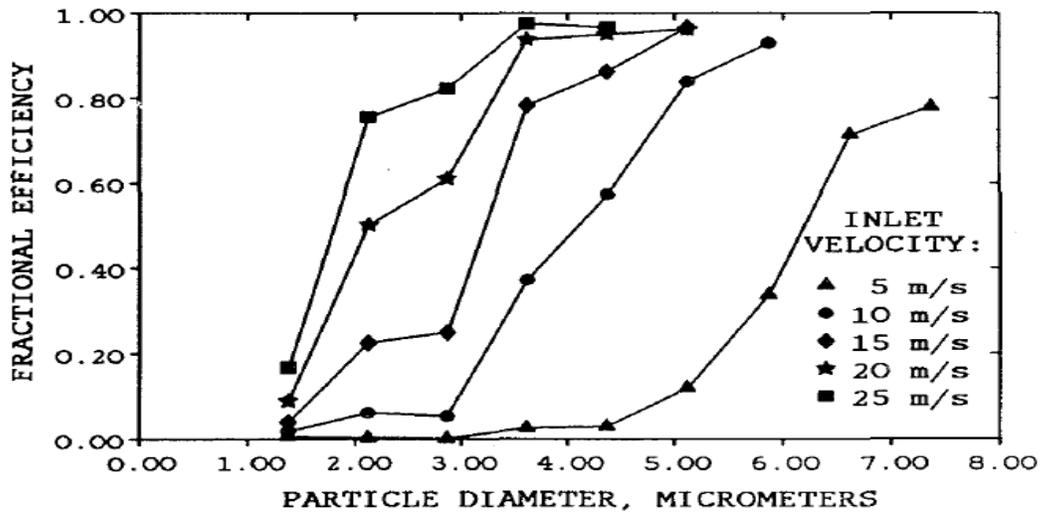
NOMOGRAMA DE EFICIENCIA, η , PARA EL DISEÑO DE CICLONES, CON CONFIGURACIÓN BASADA EN LA FORMULACIÓN DE LEITH Y LIGHT (Economopoulou y Economopoulos, (2002))



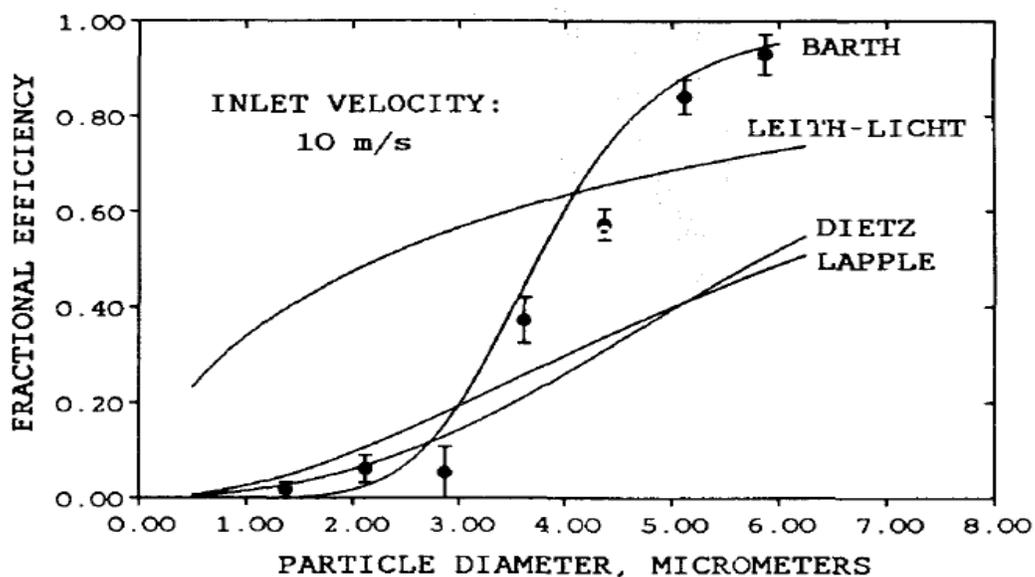
ANEXO E

CURVAS EXPERIMENTALES DE EFICIENCIA FRACCIONAL EN FUNCIÓN DEL DIÁMETRO DE PARTÍCULA

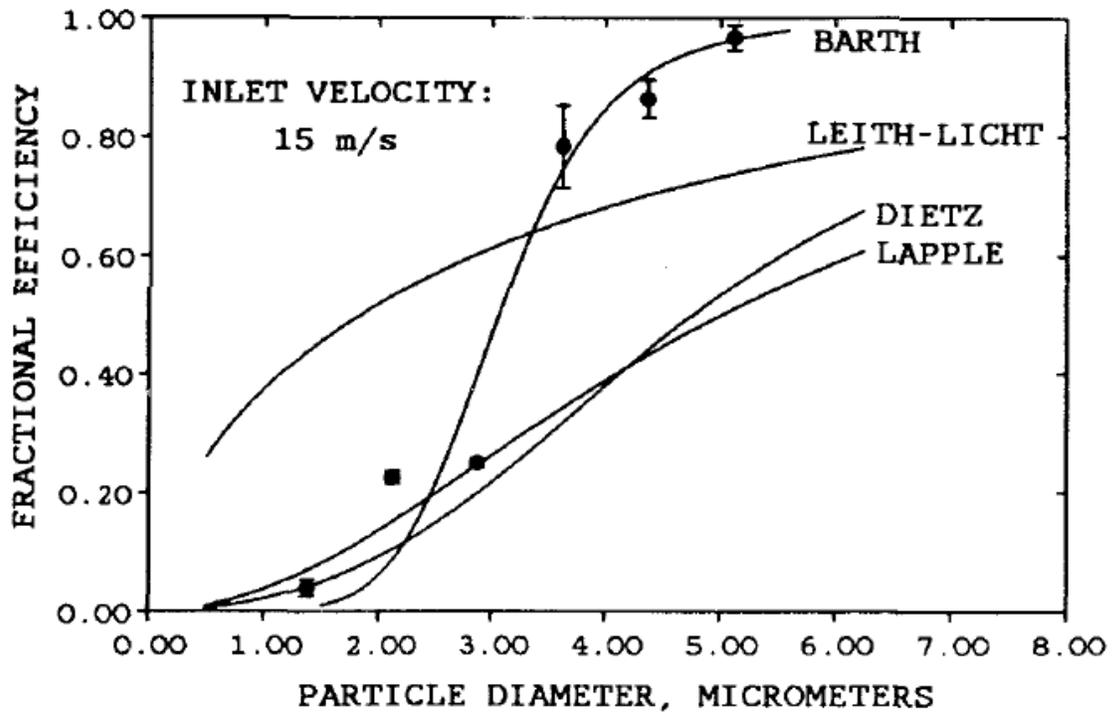
Eficiencia teórica fraccional para el ciclón Stairmand de eficiencia alta (Dirgo y Leith, (1985)).



Eficiencia fraccional teórica del ciclón en función de las diferentes configuraciones a una velocidad de entrada constante de 10 m/s (Dirgo y Leith, (1985)).



Eficiencia fraccional teórica del ciclón en función de las diferentes configuraciones a una velocidad de entrada constante de 15 m/s (Dirgo y Leith, (1985)).



ANEXO F

**PROPIEDADES FÍSICAS DEL JUGO DE JITOMATE (Goula y Adamopoulos,
(2004a))**

<i>Concentración de ST</i>	<i>Tensión superficial a 25°C (dinas/cm)</i>	<i>Viscosidad (dina s/cm⁻²)</i>
8	69.4	-
14	-	90.32
15	54.8	-
18	-	103.55
20	36.5	-
22	-	133.23
25	25.7	-

PROPIEDADES TÉRMICAS DEL JUGO DE JITOMATE (Choi y Okos, (1986))

<i>Agua, (%)</i>	<i>T, (°C)</i>	<i>Cp, (kJ/Kg°C)</i>	<i>K, (W/m°C)</i>
95.2	30.02	4.052	0.596
95.2	60.02	4.079	0.630
95.2	90.02	4.100	0.653

COMPOSICIÓN DEL JITOMATE Y SU CAPACIDAD CALORÍFICA PARA CADA UNO DE SUS CONSTITUYENTES

<i>Componente</i>	<i>%¹</i>	<i>Cp² (Ecuación)</i>
Agua	89.7	1.996
Proteína	1.4	$2.0082 + 1.2089 \times 10^{-3}T - 1.3129 \times 10^{-6}T^2$
Grasa	0.1	$1.9842 + 1.4733 \times 10^{-3}T - 4.8008 \times 10^{-6}T^2$
Carbohidrato	7	$1.5488 + 1.9625 \times 10^{-3}T - 5.9399 \times 10^{-6}T^2$
Fibra	1.1	$1.8459 + 1.8306 \times 10^{-3}T - 4.6509 \times 10^{-6}T^2$
Cenizas	0.7	$1.0926 + 1.8896 \times 10^{-3}T - 3.6817 \times 10^{-6}T^2$
Total	100	$\sum \text{fracción } (i) \cdot Cp(i), \text{ (KJ/KgK)}$

¹ Álvarez (1999). ² Rahman S, (1995)

Piseck, 1997, determinó el calor específico de la leche al sumar los Cp's de sus componentes, en este trabajo se siguió el mismo sistema para encontrar los calores específicos del jugo de jitomate y el polvo de jitomate.

ANEXO G

**CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DEL ACERO INOXIDABLE Y DE LA ARCILLA
REFRACTARIA USADA PARA ESTE PROYECTO**

Material	Conductividad térmica, K, ($W/m^{\circ}C$)
Acero Cr (15 %), Ni (10 %) ¹	15
	(T=200°C) 1.00
	(T=600°C) 1.47
Arcilla Refractaria ²	(T=1000°C) 1.64
	(T=1400°C) 1.77

¹ Necati, M. y Özisik (1993). ² Kern (2000)

ANEXO H

RELACIONES GEOMÉTRICAS DEL CICLÓN “NORMAL” Y SUS CONFIGURACIONES DE DISEÑO (Economopoulou y Economopoulos, (2002); Bahamondes-Santos, (2008))

	Tipo Del Ciclón					
	Eficacia Alta		Convencional		Alto Rendimiento de procesamiento	
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Diámetro Del Cuerpo, (d_p/d_p)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Altura de la entrada, ($Ka = a/d_p$)	0.5	0.44	0.5	0.5	0.75	0.8
Anchura de la entrada, ($Kb = b/d_p$)	0.2	0.21	0.25	0.25	0.375	0.35
Diámetro de la salida del gas, ($Ke = d_c/d_p$)	0.5	0.4	0.5	0.5	0.75	0.75
Altura de la salida, ($Ks = S/d_p$)	0.5	0.5	0.625	0.6	0.875	0.85
Altura del cuerpo, (h/d_p)	1.5	1.4	2.0	1.75	1.5	1.7
Altura del cono, (z/d_p)	2.5	2.5	2.0	2.0	2.5	2.0
Altura total del ciclón, (H/d_p)	4	3.9	4	3.75	4	3.7
Diámetro de la salida del polvo, (B/d_c)	0.375	0.4	0.25	0.4	0.375	0.4
Número de cabezas de velocidad, (Nh)	6.4	9.24	8	8	8	7.96
Número de vórtices, (N)	5.5	6	6	5.5	3.7	3.4
Factor de configuración, (G)	551.2	698.7	402.9	381.8	29.79	30.48
Parámetro definido W1	0.0262	0.0424	0.0201	0.0201	-	-
Parámetro definido W2	54.759	54.327	95.430	95.430	-	-

Columnas (1) y (5) = Stairmand, 1951; columnas (2), (4) y (6) = Swift, 1969; columnas (3) = Lapple, 1951