

Universidad del Valle de Guatemala
Facultad de Ingeniería

Diseño de un deshidratador de bandejas y un intercambiador de calor que aprovecha el calor de las chimeneas de hornos de gas propano

Trabajo de investigación presentado por Ian Vogel Paetau
para optar al grado académico de
Licenciado en Ingeniería en ciencias de alimentos

Guatemala,
2006

Diseño de un deshidratador de bandejas y un intercambiador de calor que aprovecha el calor de las chimeneas de hornos de gas propano

Universidad del Valle de Guatemala
Facultad de Ingeniería

Diseño de un deshidratador de bandejas y un intercambiador de calor que aprovecha el calor de las chimeneas de hornos de gas propano

Trabajo de investigación presentado por Ian Vogel Paetau
para optar al grado académico de
Licenciado en Ingeniería en ciencias de alimentos

Guatemala,
2006

Vo. Bo.:

(f) _____
Ing. Lourdes María de Arana

Tribunal:

(f) _____
Ing. Lourdes María de Arana

(f) _____
MSc. Patricia Palacios de Palomo

(f) _____
Licda. Ana Silvia Colmenares

Fecha de aprobación:

DEDICATORIA

A Dios, por darme a una familia y amigos tan especiales.

A mi papá, por su amor, su sabiduría, por ser el ejemplo a seguir y mi inspiración.

A mi mamá por su apoyo incondicional, su amor y por ser mi inspiración.

A mi hermano, por su amor, por ser mi aliado en toda la vida.

A mi Ginis, por su absoluto amor, apoyo y por estar siempre conmigo.

A mi familia, por su cariño.

ÍNDICE

LISTA DE GRÁFICAS.....	ix
LISTA DE TABLAS.....	x

LISTA DE FIGURAS	xii
RESUMEN	xiii
I. INTRODUCCIÓN	1
II. ANTECEDENTES	2
A. Deshidratación de alimentos	2
1. El agua en los alimentos.....	3
2. Contenido en agua.....	3
3. Actividad de agua	3
4. Secado de los alimentos	6
5. Movimiento de solutos.....	6
6. Retracción	6
7. Formación de costra.....	7
8. Eficacia del blanqueado o escaldado.....	7
9. Pardeamiento no enzimático	7
10. Equipos para la desecación por aire caliente	9
B. Intercambiadores de calor	10
1. Definición	10
2. Tipos básicos de intercambiadores de calor	10
3. Intercambiador de tubos y casco	10
C. Deshidratación del tomate	11
1. Proceso general de deshidratación	11
D. Métodos de secado de cebolla	12
E. Perejil deshidratado	13
III. JUSTIFICACIÓN	14
IV. OBJETIVOS	15
V. MATERIALES Y MÉTODOS	16
A. Materiales	16
1. Materiales de construcción del intercambiador de calor y cámara de deshidratado.....	16
2. Alimentos para deshidratar	16
3. Reactivos.....	17
4. Equipo de medición	17
B. Métodos	17
1. Fabricación del deshidratador	17
2. Condiciones de uso del deshidratador fabricado.....	17
3. Pruebas de deshidratado de tomate	18
4. Pruebas de deshidratado de cebolla.....	18
5. Pruebas de deshidratado del perejil.....	19
6. Realización de pruebas de secado para los productos, variando las configuraciones de diseño del equipo instalado	19

7.	Determinación de factibilidad del aprovechamiento del calor recuperado mediante pruebas de deshidratado de tomate, perejil y cebolla.	19
8.	Determinación de propiedades físicas de los productos frescos y deshidratados.....	19
VI.	RESULTADOS	21
A.	Propiedades del deshidratador variando las configuraciones de diseño.....	21
B.	Cálculos teóricos del proceso de deshidratación:	26
1.	Cálculos para la configuración de diseño utilizando el ventilador de alta capacidad	27
2.	Cálculos para la configuración de diseño utilizando el ventilador de baja capacidad.....	30
C.	Pruebas de secado variando las configuraciones del equipo.....	32
1.	Prueba número 1	32
2.	Prueba número 2	33
3.	Prueba número 3	35
4.	Pruebas de secado utilizando como fuente de calor el intercambiador.....	36
5.	Pruebas de secado utilizando como fuente de calor la resistencia eléctrica y el intercambiador.....	39
VII.	DISCUSIÓN.....	43
VIII.	CONCLUSIONES	52
IX.	RECOMENDACIONES.....	53
X.	BIBLIOGRAFÍA.....	54
XI.	ANEXOS	56
XII.	PRESUPUESTO.....	63

LISTA DE GRÁFICAS

1.	Gráfica 1: Temperatura del deshidratador variando las configuraciones de diseño.....	24
2.	Gráfica 2: Consumo eléctrico de resistencia y ventilador variando las configuraciones de diseño.....	25
3.	Gráfica 3: Tiempo de operación de hornos de gas propano de la panadería.....	26
4.	Gráfica 4: Curva de secado de prueba número 1.....	33
5.	Gráfica 5: Curva de secado de prueba de tomate número 2.....	34
6.	Gráfica 6: Curva de secado de prueba número 3.....	36
7.	Gráfica 7: Curva de secado de tomate.....	37
8.	Gráfica 8: Curva de secado de cebolla.....	38
9.	Gráfica 9: Curva de secado de perejil.....	39
10.	Gráfica 10: Curva de secado de tomate.....	40
11.	Gráfica 11: Curva de secado de cebolla.....	41
12.	Gráfica 12: Curva de secado de perejil.....	42
13.	Gráfica 13: Curvas típicas de las isotermas de adsorción y de resorción de los alimentos.....	56
14.	Gráfica 14: Zonas hipotéticas que ubican el agua en un producto; zona III: libre; Zona II: capas más estructuradas y en microcapilares; Zona: capa monomolecular BET.....	57

LISTA DE TABLAS

1. Tabla 1: Utilizando resistencia eléctrica (potencia media-alta), sin ventilador.....	21
2. Tabla 2: Utilizando Horno 1, extractor de (1/60) HP posicionado en la parte superior del deshidratador.....	21
3. Tabla 3: Utilizando Horno 1, extractor de 12V 0.16Amp posicionado en la parte superior del deshidratador.....	21
4. Tabla 4: Utilizando Horno 1, Horno 2, Horno 3, extractor de (1/60) HP posicionado en la parte superior del deshidratador.....	22
5. Tabla 5: Utilizando Horno 1, Horno 2, Horno 3, extractor de 12V 0.16Amp posicionado en la parte superior del deshidratador.....	22
6. Tabla 6: Utilizando Horno 1, resistencia eléctrica (media potencia), extractor de (1/60) HP posicionado en la parte superior del deshidratador.....	22
7. Tabla 7: Utilizando Horno 1, resistencia eléctrica (potencia baja), extractor de 12V 0.16Amp posicionado en la parte superior del deshidratador.....	22
8. Tabla 8: Utilizando Horno 1, Horno 2, Horno 3, resistencia eléctrica (media potencia), extractor de (1/60) HP posicionado en la parte superior del deshidratador.....	23
9. Tabla 9: Utilizando Horno 1, Horno 2, Horno 3, resistencia eléctrica (potencia baja), extractor de 12V 0.16Amp posicionado en la parte superior del deshidratador.....	23
10. Tabla 10: Utilizando resistencia eléctrica (potencia media-alta), extractor de (1/60) HP posicionado en la parte superior del deshidratador.....	23
11. Tabla 11: Utilizando resistencia eléctrica (media potencia), extractor de 12V 0.16Amp posicionado en la parte superior del deshidratador.....	23
12. Tabla 12: Velocidad de salida de aire.....	26
13. Tabla 13: Diámetro de salida de aire.....	26
14. Tabla 14: Temperatura de aire utilizando el ventilador de alta capacidad.....	26
15. Tabla 15: Temperatura de aire utilizando el ventilador de baja capacidad.....	26
16. Tabla 16: Humedad de los sólidos.....	27
17. Tabla 17: Temperatura de los sólidos.....	27
18. Tabla 18: Propiedades del aire.....	27
19. Tabla 19: Tiempos de rotación de bandejas de prueba número 1.....	32
20. Tabla 20: Resultados de peso para la prueba número 1.....	33
21. Tabla 21: Resultados de humedad para la prueba número 1.....	33
22. Tabla 22: Tiempos de rotación de bandejas de prueba número 2.....	34
23. Tabla 23: Resultados de peso para la prueba número 2.....	34
24. Tabla 24: Resultados de humedad para la prueba número 2.....	34
25. Tabla 25: Tiempos de rotación de bandejas de prueba número 3.....	35
26. Tabla 26: Resultados de peso para la prueba número 3.....	35
27. Tabla 27: Resultados de humedad para la prueba número 3.....	35

28. Tabla 28: Tiempos de rotación de bandejas para prueba de secado de tomate.....	36
29. Tabla 29: Resultados de peso para prueba de secado de tomate.....	36
30. Tabla 30: Resultados de humedad para prueba de secado de tomate.....	37
31. Tabla 31: Tiempos de rotación de bandejas para prueba de secado de cebolla.....	37
32. Tabla 32: Resultados de peso para prueba de secado de cebolla.....	38
33. Tabla 33: Resultados de humedad para prueba de secado de cebolla.....	38
34. Tabla 34: Tiempos de rotación de bandejas para prueba de secado de perejil.....	38
35. Tabla 35: Resultados de peso para prueba de secado de perejil.....	39
36. Tabla 36: Resultados de humedad para prueba de secado de perejil.....	39
37. Tabla 37: Tiempos de rotación de bandejas para prueba de secado de tomate.....	40
38. Tabla 38: Resultados de peso para prueba de secado de tomate.....	40
39. Tabla 39: Resultados de humedad para prueba de secado de tomate.....	40
40. Tabla 40: Tiempos de rotación de bandejas para prueba de secado de cebolla.....	41
41. Tabla 41: Resultados de peso para prueba de secado de cebolla.....	41
42. Tabla 42: Resultados de humedad para prueba de secado de cebolla.....	41
43. Tabla 43: Tiempos de rotación de bandejas para prueba de secado de perejil.....	42
44. Tabla 44: Resultados de peso para prueba de secado de perejil.....	42
45. Tabla 45: Resultados de humedad para prueba de secado de perejil.....	42

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema de diseño de intercambiador de calor y deshidratador de bandejas.....	58
Figura 2: Secador tipo Kiln.....	59
Figura 3: Configuración típica de un secador de bandejas de dos carros.....	59
Figura 4: Configuración típica de un deshidratador de bandejas con calentadores auxiliares.....	60
Figura 5: Secador de túnel con configuración de contracorriente.....	60
Figura 6: Secador de túnel con configuración de co-corriente.....	61
Figura 7: Ilustración esquemática de un secador de bandejas.....	62

RESUMEN

El objetivo de este trabajo de graduación es diseñar y construir un deshidratador de bandejas que utiliza el calor de desperdicio de otros hornos de combustión. Lo que se desea es aprovechar el calor que los hornos de gas propano pierden a través de sus chimeneas. Para lograr esto, se diseñó y construyó un intercambiador de calor de tubos, el cual se instaló sobre las chimeneas de los hornos de gas propano. El intercambiador se conecta al deshidratador para proporcionar la fuente de calor. Se llevaron a cabo pruebas para determinar cuál es el diseño que mejor se adapta al aprovechamiento del calor. Se determinó que el diseño que mejor se adapta al aprovechamiento de calor es aquel que utiliza un ventilador de (1/60) HP y el intercambiador como única fuente de calor. Los resultados de las pruebas llevadas a cabo con tomate, cebolla y perejil demostraron que es factible utilizar el calor de desperdicio recuperado de las chimeneas de los hornos de gas propano para llevar a cabo la deshidratación.

I. INTRODUCCIÓN

Para la elaboración de cualquier tipo de producto, la industria hace uso de equipos y maquinarias que a lo largo de toda la historia reemplazaron al sistema doméstico y se convirtieron en el mecanismo típico de producción de las economías modernas. Para operar estos equipos es necesario hacer uso de la energía disponible en cada ámbito de trabajo. La energía es la base de la civilización industrial; sin ella, la vida moderna dejaría de existir. Durante la década de 1970, el mundo empezó a ser consciente de la vulnerabilidad de los recursos de energía.

Se pueden describir varios tipos de medidas de conservación de energía. Uno de ellos implica el uso más eficiente de esta misma, construyendo equipos que cumplan su función de trabajo utilizando la energía de una manera eficiente.

Con este trabajo de investigación se desea diseñar y construir un equipo de deshidratación de alimentos que cumpla con la característica de ser completamente funcional y a la vez energéticamente eficiente. La idea principal consiste en la utilización de la energía de desperdicio de otros equipos. Específicamente, se desea recuperar parte del calor de los gases de combustión de hornos de gas propano para ser utilizado como fuente energética en el proceso de deshidratación. De esta manera, el equipo de deshidratación no necesita generar su propio calor, haciéndolo energéticamente eficiente.

II. ANTECEDENTES

A. Deshidratación de Alimentos

Los microorganismos requieren agua para crecer y reproducirse; la conservación por deshidratación saca provecho de esta situación. El contenido de agua del producto se reduce por debajo de un determinado valor crítico (el cual varía según el producto) y se hace imposible el crecimiento de los microorganismos. (9)

La deshidratación es un método tradicional de conservar los alimentos; el secado al sol se practicaba ya en épocas tan remotas como 2000 a. de C. y las hortalizas secas se venden desde hace alrededor de un siglo y las sopas desecadas desde hace más tiempo. Un pan de “sopa portátil”, que se cree formaba parte de las provisiones del Capitán Cook para su viaje alrededor del mundo en 1772, existe todavía. Se asemeja a un pan de cola y los análisis químicos han demostrado que su composición ha cambiado poco con el paso de los años. (9)

Las frutas secas se han producido durante muchos años secándolas al sol, pero estas técnicas tan sencillas no son adecuadas para la deshidratación de la mayor parte de los otros tipos de alimentos. En la práctica moderna se utilizan muchos tipos de equipos para deshidratar los alimentos. La desecación se lleva a cabo por lo general haciendo pasar aire a una temperatura y humedad cuidadosamente reguladas sobre o a través del alimento en desecadores de bandeja, secadores del tipo de túnel o tambores secadores rotatorios. Asimismo se utilizan secadores calentados al vacío; la temperatura necesaria para la deshidratación a presión reducida es mucho más baja que la que se requiere a las presiones normales. En el secado al vacío la atmósfera que rodea al alimento contiene una concentración mucho más baja de oxígeno que en los métodos normales de secado, y esto reduce el grado al que tienen lugar los cambios oxidativos. (9)

Antes de deshidratar las hortalizas, ya sea mediante desecación por congelación u otros métodos, son escaldados o “blanqueados” por inmersión en agua hirviendo o por tratamiento con vapor. Esto inactiva las enzimas oxidativas como la catalasa, la fenolasa y la oxidasa del ácido ascórbico y mejora la estabilidad del producto deshidratado. En el caso de las hortalizas con color, el blanqueado mejora asimismo el color del producto. Algo de las vitaminas hidrosolubles se pierde durante el blanqueado en agua pero esto se reduce al mínimo dejando que aumente la concentración de las sustancias hidrosolubles en el agua del blanqueado. Por lo general se añade sulfito de sodio al agua utilizada para blanquear las hortalizas debido a que así se mejora tanto el color como la retención del ácido ascórbico. (9)

No es necesario remover toda el agua del alimento a fin de impedir la multiplicación de los microorganismos. Las bacterias no se multiplicarán en los alimentos con una actividad acuosa a_w inferior a 0.91. El mínimo nivel a_w aceptable por la mayor parte de las levaduras y los mohos es de 0.88 y 0.80, respectivamente. La mayor parte de los alimentos deshidratados contienen menos del 25 por ciento de agua y tienen una actividad acuosa inferior a 0.6. Los alimentos secados por congelación no tienen prácticamente nada de humedad. (9)

La multiplicación de microorganismos no debe ocurrir en los alimentos deshidratados elaborados de manera adecuada, pero no son inmunes a otros tipos de descomposición. Los alimentos que contienen grasas son propensos a enranciarse después de cierto tiempo, en particular si el contenido de agua es reducido a un valor demasiado bajo. La vida de almacenamiento de los alimentos deshidratados aumenta bastante y la pérdida de vitamina A y ácido ascórbico disminuye considerablemente en ausencia de oxígeno. Si se llena por completo el recipiente con alimentos deshidratados comprimidos se reduce al mínimo la cantidad de oxígeno. Empero es preferible la sustitución del aire en el interior del recipiente con nitrógeno; la mayor parte de los alimentos deshidratados pueden ser almacenados durante dos años o más en latas selladas en las que el aire ha sido sustituido por nitrógeno. (9)

Una de las grandes ventajas de los alimentos deshidratados consiste en que ocupan muy poco espacio. Las papas deshidratadas en forma de polvo, por ejemplo, sólo ocupan un volumen igual a diez por ciento de las papas comunes. (9)

1. El agua en los alimentos. El agua es un contribuyente importante a las propiedades organolépticas de los alimentos. La pérdida de agua, en los alimentos ricos en ella, o la ganancia de agua en alimentos en que es escasa, reduce su calidad organoléptica y por tanto su aceptabilidad. Por otra parte, la presencia de agua, a ciertas concentraciones, en los alimentos facilita su deterioro por acción de los microorganismos y las enzimas, o a través de reacciones químicas o enzimáticas. Por lo tanto, retirando el agua de los alimentos o haciéndola menos disponible, se puede extender la vida útil de los mismos. (4)

2. Contenido en agua. El contenido en agua de un producto se puede expresar en término de peso húmedo (WWB), es decir, masa de agua por unidad de masa del producto húmedo, o en términos de peso seco (DWB), es decir masa de agua por unidad de masa del extracto seco. El último es el método más frecuentemente utilizado en los cálculos de secado. (4)

3. Actividad de agua. Al considerar la influencia del contenido en agua en la estabilidad de los alimentos, no es el contenido total en agua lo importante, sino la cantidad de agua disponible para el crecimiento microbiano y la actividad química. Existe una abundante bibliografía que pone de manifiesto que una parte del contenido en agua de los alimentos se halla fuertemente ligado a puntos específicos de los componentes sólidos y que otra cantidad adicional se halla menos firmemente ligada, pero que tampoco es fácilmente disponible como disolvente para diversos solutos. En el estudio de la disponibilidad del agua en los alimentos, se mide una propiedad fundamental, conocida como actividad de agua. Esta propiedad viene definida por la expresión: (4)

$$a_w = \frac{P_v}{P_w}$$

Donde p_v es presión de vapor de agua ejercida por la disolución, o el sólido húmedo, y p_w es la presión de vapor del agua pura, a la misma temperatura. La representación gráfica del contenido en agua en función de la actividad de agua se conoce como isoterma de sorción. Las isotermas se pueden preparar por adsorción, es decir colocando un producto seco en contacto con una atmósfera de humedad relativa creciente, o por desorción, es decir, colocando el producto húmedo en contacto con atmósferas de humedad relativa decreciente. (4)

La actividad acuosa representa el grado de interacción del agua con los demás constituyentes, o la porción que está disponible en un producto para sustentar las reacciones ya mencionadas. Con base a este valor se puede predecir la estabilidad de un alimento. (1)

Este término también puede expresarse de la siguiente manera:

$$a_w = \frac{f}{f^\circ} = \frac{P}{P_o} = \frac{HR}{100} = \frac{Ma}{Ma + Ms}$$

(1)

donde:

f = fugacidad en un determinado estado a temperatura T

f° = fugacidad en un estado estándar a T

P = presión de vapor del agua del alimento a T

P_o = presión de vapor del agua pura a T

HR = humedad relativa

Ms = moles de soluto (g/pm)

Ma = moles de agua (g/18) (1)

La fugacidad es una medida de la tendencia de una sustancia a escaparse; en virtud que el vapor de agua se comporta aproximadamente como un gas ideal, se puede emplear la presión de vapor en lugar de la fugacidad. La escala de medición de este parámetro es de cero (un producto absolutamente seco) a uno (agua pura), mientras que para la humedad relativa es de 0 a 100%. (1)

La actividad acuosa es una propiedad intrínseca y se relaciona con el contenido de humedad por medio de las curvas o isotermas de adsorción y desorción; por esta razón es muy importante no confundir la actividad acuosa con el contenido de agua ya que la relación no es lineal. Para entender mejor esto, considérese un material orgánico hidratado y almacenado a una temperatura constante en una cámara cerrada; al cabo de algún tiempo, su presión de vapor correspondiente provocará que haya transferencia de moléculas de agua y la cámara adquirirá una humedad relativa constante que estará en equilibrio con el contenido de agua del material; es decir, no hay movimiento de humedad en ningún sentido. (1)

Dicha humedad estará en función del grado de interacción de los solutos con el agua y se refleja en la facilidad de ésta para escapar del alimento. En este experimento se tendría un par de valores, de humedad relativa vs. contenido de agua, a una temperatura determinada; si esto se repite muchas veces con diferentes contenidos de humedad, y los resultados se grafican, se obtendría la isoterma de desorción (deshidratado del sólido). (1)

Por lo contrario, si ahora se parte de un producto seco y se somete a atmósferas de humedad relativa elevadas, se observará una transferencia de masa del gas al sólido hasta llegar a un equilibrio; al repetir este experimento con diferentes humedades, se tendrán nuevamente pares de valores que al graficarse crean la isoterma de adsorción (hidratación del sólido). Ambas curvas se representan en la figura 1 del Anexo. (1)

Al analizar esta figura, se puede apreciar que para un contenido de humedad constante la actividad acuosa es menor durante la desorción que en la adsorción o que para una a_w determinada, la

humedad es mayor en el secado que en la hidratación. Se observa también que estos procesos opuestos no son reversibles por un camino común, fenómeno que recibe el nombre genérico de histéresis. (1)

Para entender mejor la histéresis, considérese como ejemplo una proteína hidratada que se seca en una atmósfera de humedad relativa de 34% y alcanza el equilibrio a un contenido de 10% de agua (curva de desorción); por otra parte, si la misma proteína completamente deshidratada se coloca en dicha atmósfera, se adsorbe humedad y llega al equilibrio con un contenido de sólo 7% de agua. Esto se debe a que en el secado se propician daños térmicos que alteran los grupos polares (hidroxilos, aminas, carbonilos, etc.) y como dichos grupos ya no están disponibles la capacidad de rehidratación se reduce. (1)

Así, se obtienen dos curvas diferentes para un mismo producto. Este efecto histéresis es típico de muchos alimentos. Las isotermas de los alimentos se dividen frecuentemente en tres regiones, denominadas A, B y C. En la región A, las moléculas de agua están fuertemente ligadas a puntos específicos del sólido. Esos puntos pueden ser grupos hidroxilo de los polisacáridos, grupos amino y carbonilo de las proteínas y otros, a los que el agua se une por enlaces de hidrógeno, enlaces ion-dipolo u otras interacciones fuertes. Esta agua ligada se considera no disponible como disolvente y, por tanto, no contribuye a la actividad microbiana o química. Es frecuente referirse a ella como el valor monocapa o monomolecular y se corresponde con actividades de agua en el intervalo 0 - 0.35. Los valores de la monocapa citados en la bibliografía suelen encontrarse en el rango 0.05 – 0.11 (DWB). (4)

Por encima de la región A, el agua puede todavía estar ligada al sólido, pero menos fuertemente que en la región A. Ha sido habitual considerar a la región B como una región de multicapas y a la región C como una, en la que la disminución de la presión de vapor de agua se debe a razones estructurales y efectos de disolución. Sin embargo, la distinción es dudosa, dado que estos efectos se pueden dar a lo largo de toda la isoterma. Por tanto, por encima de la región A, el descenso de la presión de vapor de agua de los sólidos húmedos se debe a enlaces débiles, a la influencia de las fuerzas capilares en la estructura del sólido y a la presencia de sólidos solubles en disolución. Todos estos efectos se dan a riquezas de agua bajas, <1.0 DWB. La mayor parte de los alimentos exhiben presiones de vapor de agua próximas a las del agua pura cuando el contenido de agua es superior a 1.0 (DWB). La temperatura afecta al comportamiento de sorción de los alimentos. La cantidad de agua absorbida, a cualquier valor de a_w , disminuye al aumentar la temperatura.(4)

El conocimiento de las características de sorción de un alimento facilita la predicción de su vida útil. En muchos casos, la riqueza en agua que permite una estabilidad máxima se corresponde con el valor de la monocapa. Este dato permite también predecir los tiempos de secado y la energía necesaria para un proceso de este tipo. En el diseño de los sistemas de secado por aire caliente, no se puede disminuir la riqueza en agua del producto por debajo de la que tiene cuando se halla en equilibrio con el aire utilizado para el secado (a una temperatura específica y con una determinada humedad). Para secar hasta contenidos en agua muy bajos, es decir, correspondientes a la región de la monocapa, hay que suministrar más energía que el calor latente de vaporización, para superar las fuerzas implicadas en la unión del agua a los puntos específicos, antes citados. (14) (15)

En la figura 2 del Anexo se delimitan tres zonas hipotéticas que ubican el agua en un producto; la que integra la zona III se considera libre; se encuentra en macrocapilares; forma parte de las soluciones que disuelven las sustancias de bajo peso molecular; es la más abundante y fácil de congelar y evaporar, y su eliminación reduce la actividad acuosa, a_w , a 0.8. (1)

En la zona II el agua se localiza en diferentes capas más estructuradas y en microcapilares; es más difícil de quitar que la anterior, pero al lograrlo se obtienen valores de a_w de aproximadamente 0.3. (1)

Finalmente, el agua en la zona I representa la capa monomolecular BET, y es la más difícil de eliminar en los procesos térmicos comerciales de secado; en algunos casos se puede reducir parcialmente en la deshidratación, pero no es recomendable, ya que, además de que se requeriría mucha energía para ello y se podría dañar el alimento, su presencia ejerce un efecto protector, sobre todo contra las reacciones de oxidación de lípidos porque actúa como barrera de oxígeno. (1)

4. Secado de los alimentos. Entre los componentes de los alimentos, figuran proteínas, grasas, carbohidratos, vitaminas, enzimas y sales inorgánicas y muchos de estos componentes están fuertemente hidratados. El agua presente en los alimentos no se encuentra en estado puro, sino que puede estar formando parte de disoluciones de sólidos, de geles y de emulsiones o ligada, de diversos modos, a los constituyentes sólidos. Además, tanto los tejidos vegetales como los animales son de naturaleza celular, hecho que también afecta a su conducta durante la desecación. (11)

5. Movimiento de solutos. Una característica singular e importante del secado de los alimentos es el movimiento de sólidos solubles durante la desecación. El agua líquida que fluye hacia la superficie durante el secado contiene diversos productos en disolución. El desplazamiento de algunos compuestos solubles se ve dificultado por las paredes celulares, que actúan como membranas semipermeables. A la migración de sólidos en los alimentos, contribuye también la retracción del producto, que crea presiones en el interior de las piezas. El resultado neto puede ser el acumulo de componentes solubles en la superficie, al evaporarse el agua. (4)

La migración de sólidos solubles también puede ocurrir en el sentido opuesto, hacia el interior de las piezas. A medida que la superficie se seca, se va estableciendo un gradiente de concentración entre la superficie y el centro húmedo de la pieza, que puede provocar la difusión de solutos hacia el centro. Que predomine uno u otro de ambos fenómenos depende de las características del producto y de las condiciones del secado. Se ha demostrado que ambos mecanismos se dan durante el secado de los alimentos. (16)

6. Retracción. Durante el secado de los tejidos animales y vegetales, por cualquier método, con la posible excepción de la liofilización, se produce cierto grado de retracción del producto. Los productos coloidales también se retraen cuando se secan. Durante las primeras fases del secado, a bajas velocidades, la cuantía de la retracción está simplemente relacionada con la cantidad de agua eliminada. Hacia el final del mismo, la retracción es cada vez menor, de modo que el tamaño y la forma finales (o definitivas) del producto se alcanzan antes de terminarse el secado. (4)

Tanto la densidad a granel, como la porosidad, de las piezas de hortalizas desecadas dependen, en gran medida, de las condiciones de secado. Si las velocidades iniciales de secado son altas, las capas externas de las piezas se tornan rígidas y su volumen final se fija antes. Al continuar el secado, los

tejidos se rompen internamente, generando una estructura abierta. En estas condiciones, el producto tiene poca densidad a granel y es fácilmente rehidratable. Si las velocidades iniciales de desecación son bajas, la retracción de las piezas rinde un producto de mayor densidad. La retracción de los alimentos durante el secado puede influir en las velocidades de secado, debido a los cambios en el área de la superficie de desecación y a la creación de gradientes de presión en el interior del producto. Algunos trabajos realizados indican que la retracción no afecta a la conducta durante el secado. (5)

7. Formación de costra. Se ha observado que durante el secado de algunas frutas, carnes y pescados, se suele formar una película impermeable y dura en la superficie, lo que normalmente frena el secado, a este fenómeno se le suele denominar encostrado o formación de costra. Aunque se desconozca el mecanismo exacto, es probable que esté influido por múltiples factores, entre los que figuran la migración de sólidos solubles a la superficie y las elevadas temperaturas que se alcanzan en ella, hacia el final del secado, que inducen complejos cambios físicos y químicos en la capa superficial. (16) (7).

8. Eficacia del blanqueado o escaldado. Las frutas y verduras frescas contienen muchas enzimas activas que provocan el deterioro posterior a la cosecha de la calidad y el valor nutricional. Este deterioro se produce incluso cuando los productos se congelan. Así que, por lo general, las frutas y verduras se blanquean antes de congelarlas o enlatarlas para inactivar estas enzimas. (13)

Las estabilidades térmicas varían considerablemente. Por lo tanto, las condiciones del blanqueado necesitan enfocarse a las enzimas más resistentes al calor. La peroxidasa es una de las enzimas de las plantas más estables al calor. De este modo, resulta un buen indicador de qué tan adecuado es el escaldado, ya que los tratamientos térmicos suficientes para inactivar a la peroxidasa también inactivan a la mayoría de las otras enzimas. (13)

Para determinar si el proceso de blanqueado se llevó a cabo correctamente se debe utilizar el reactivo Guayacol junto a peróxido de hidrógeno. En presencia de la enzima peroxidasa, estos reactivos forman compuestos café-rojizos, lo que indica que el blanqueado fue inadecuado. (13)

Para realizar este experimento se agrega 1ml de solución de guayacol al 1% y 1ml de peróxido de hidrógeno al 0.5%. (13)

9. Pardeamiento no enzimático. Con frecuencia, durante el procesamiento, el almacenamiento y la preparación de los alimentos y de los ingredientes de estos, se forman colores pardos o cafés. Algunas reacciones que producen colores cafés son catalizadas por enzimas. Estas reacciones casi siempre implican la oxidación de componentes de los alimentos. Otras reacciones de pardeamiento son de naturaleza no enzimática. Entre estas se encuentran la caramelización de los azúcares y la reacción de Maillard. (13)

a. Caramelización. Los azúcares en solución son bastante estables al calor a valores de pH entre 3 y 7. Sin embargo, al fundir azúcar seco o calentar soluciones de azúcar en presencia de catalizadores ácidos o básicos, el azúcar se carameliza. La caramelización da como resultado la formación de colores café y aromas agradables. (13)

b. Reacción de Maillard. La reacción entre los azúcares y las aminas se conoce como la reacción de Maillard. El color café en el pardeamiento de Maillard es el resultado de la formación de melanoidinas, que son moléculas complejas de alto peso molecular. La reacción inicial es entre el grupo aldehído o cetona de una molécula de azúcar y un grupo amino libre de una molécula de proteína o

aminoácido. La reacción podría ser deseable (por ejemplo, el aroma a chocolate que se percibe cuando los granos de cacao se tuestan, es el resultado del pardeamiento) o indeseable (por ejemplo, el color café oscuro desagradable que alguna vez aparece en las papas fritas durante el freimiento). (13)

Aunque esta reacción se puede efectuar en diferentes condiciones, está principalmente influenciada por los siguientes parámetros:

1) A pH alcalino se incrementa la velocidad y alcanza un máximo a pH 10, sin embargo, hay que recordar que existen muy pocos alimentos en forma natural con $\text{pH} > 7$ (como el huevo). Por lo contrario, el mecanismo se inhibe en condiciones muy ácidas que normalmente no se encuentran en los alimentos. (1)

2) Las temperaturas elevadas también la aceleran, pero debido a que su energía de activación es baja, también se observa hasta en condiciones de refrigeración. En términos generales, la E_a es del orden de 16 a 30 kcal/mol, y el valor de su coeficiente de temperatura, Q_{10} (en el intervalo de 0 a 70°C), es de 2 a 3; es decir, por cada 10°C de aumento, la velocidad se incrementa de 2 a 3 veces. (1)

3) Otro factor importante es la actividad acuosa por lo que los alimentos de humedad intermedia son los más propensos. Una actividad acuosa menor no permite la movilidad de los reactantes y se inhibe el mecanismo, y una mayor produce el mismo efecto ya que el agua, por ser el producto de la propia reacción, ejerce una reacción inhibitoria, de acuerdo con la ley de acción de masas, ya que diluye los reactantes. (1)

4) El tipo de aminoácido es decisivo, puesto que estos serán más reactivos en la medida en que se incremente el tamaño de la cadena y tengan más de un grupo amino. Por esta razón, la lisina, con su aminoácido en posición ϵ es el más activo; también pueden intervenir otros, como la arginina, la histidina y el triptofano. Se sabe que en los sistemas modelo de glucosa-aminoácido, la velocidad se incrementa con los aminoácidos cuyo grupo amino está más alejado del carboxilo. El aspartamo es un dipéptido y también está sujeto a estos cambios; con la glucosa presenta una energía de activación de 22 kcal/mol y un valor de Q_{10} de 2.4. (1)

5) Los azúcares reductores que más favorecen la reacción de Maillard son, en primer término las pentosas y, en segundo término, las hexosas; asimismo, las aldosas actúan más fácilmente que las cetosas, y los monosacáridos son más efectivos que los disacáridos. Con base en esto, y en términos generales, la xilosa es el azúcar más activo, seguido de la galactosa, la glucosa, la fructosa, la lactosa y la maltosa; por su parte, la sacarosa, por no tener poder reductor, no interviene a menos que se hidrolice previamente, lo cual es muy sencillo. Este ordenamiento no es estricto, ya que en sistemas específicos, como el freído de papas, la fructosa es más activa que la glucosa, y en otros esta situación se invierte. Los ácidos nucleicos también intervienen porque contienen ribosa que es altamente reactiva. En los sistemas modelo de caseína se ha demostrado que esta transformación se lleva a cabo a diferentes velocidades de acuerdo con el azúcar que se emplea. (1)

10. Equipos para la desecación por aire caliente

a. Secadero de armario. Básicamente consiste en una cabina aislada, provista de un ventilador, para hacer circular el aire a través de elementos calefactores colocados en su interior. El aire caliente es dirigido por pantallas ajustables, bien horizontalmente entre las bandejas cargadas de alimentos, o bien verticalmente a través de bandejas perforadas y las piezas de alimento. El secadero

dispone de mecanismos reguladores, para controlar la velocidad de admisión de aire fresco y la cantidad deseada de aire circulante. Los calentadores del aire pueden ser quemadores directos de gas, serpentines calentados con vapor o, en modelos más pequeños, calentadores de resistencia eléctrica. En los sistemas de flujo transversal, se utilizan velocidades del aire de 2-5 m s⁻¹ y, en los de flujo ascendente, velocidades de 0.5-1.25 m³ s⁻¹ (m² de área de bandeja). Los secadores de armario resultan relativamente baratos, muy flexibles y de bajo costo de mantenimiento. Se utilizan unidades individuales o grupos de unidades, principalmente para secar frutas y hortalizas. Su capacidad oscila entre 1 y 20 toneladas por día. También son útiles para el trabajo a escala piloto. (4)

En los secadores de bandejas el producto alimenticio se extiende sobre bandejas en las que tiene lugar la desecación. La calefacción se puede llevar a cabo mediante una corriente de aire que pasa sobre la bandeja, por conducción en bandejas calefactoras, por soportes calentados o por radiación desde superficies calientes. La mayoría de secadores de bandejas están calentados con aire que a la vez extrae el vapor. (8)

Los secadores de bandeja son muy flexibles en su operación. La velocidad, temperatura y humedad del aire y el tiempo de secado pueden ser todos variados en gran medida para adaptarse a las características de cualquier producto en particular. Los secadores modernos normalmente se encuentran equipados con instrumentación y sistemas de control. Los secadores de bandeja se utilizan normalmente para secar lotes relativamente pequeños de alimentos. La principal desventaja es el alto requerimiento de mano de obra necesario para el llenado y vaciado de las bandejas, y la colocación de estas en el secador. (6)

También existe el problema que el producto que se encuentra más cerca de la entrada de aire caliente se seca mucho más rápido que el producto que se encuentra cerca de la salida del aire húmedo. La solución para este problema es la rotación de las bandejas a lo largo del proceso de secado. (10)

En la figura 4 del Anexo se detalla un secador de bandejas tipo Kiln. Este mismo se utiliza para secar alimentos como granos, frutas y verduras. En este caso se tiene un paso de aire vertical. El producto se extiende sobre bandejas perforadas que permiten el paso del aire, el cual circula por elementos calefactores para aumentar su temperatura. (2)

En la figura 5 del Anexo se detalla un secador de doble carro, por el cual el aire caliente para horizontalmente sobre las bandejas que contienen el producto. El problema principal con este tipo de deshidratador es conseguir la uniformidad de secado. Este tipo de equipo se utiliza la mayoría de veces a menor escala o en plantas piloto. Los calentadores de aire pueden ser quemadores de gas directo, válvulas de vapor, intercambiadores o resistencias eléctricas. (2)

En la figura 6 del Anexo se ilustra un secador de bandejas que contiene resistencias eléctricas que proporcionan calor para el proceso de deshidratado. En este caso se cuenta con una resistencia principal, la cual calienta el aire seco que entra a la cabina de deshidratado. Además, el equipo tiene resistencias auxiliares colocadas en la parte inferior de las bandejas para hacer más eficiente el proceso de calefacción. (2)

Otro tipo de secador de bandejas consiste en los deshidratadores de túnel. En las figuras 7 y 8 del Anexo se pueden apreciar los dos tipos principales de secadores de túnel. El producto se coloca sobre bandejas que se encuentran sobre carros que circulan lentamente sobre rieles. Los secadores de

túnel pueden funcionar en contra-corriente o con la corriente de aire. La cabina de secado de estos equipos puede llegar a tener un largo de 24 m. (2)

En la figura 9 del Anexo se detalla la ilustración esquemática de un secador de bandejas. Este equipo cuenta con un ventilador de circulación de aire completamente reversible, baterías de calefacción, entradas y salidas de aire. Además, cuenta con paredes ajustables de paso de aire para poder regular el flujo de este mismo para cada tipo de producto. En algunos alimentos se requiere de un menor flujo de aire, pero mayor temperatura. Otros alimentos se deshidratan mejor al aumentar el flujo de aire y mantener la temperatura un poco más baja. En ciertas ocasiones se puede variar el paso de aire con un mismo producto pero a diferentes etapas del proceso de secado. Es decir, que para algunos alimentos conviene comenzar el proceso de deshidratado con ciertos parámetros de flujo de aire y luego modificar estos parámetros al acercarse el final del proceso de secado. (10)

B. Intercambiadores de calor

1. Definición. Un intercambiador de calor es un dispositivo que transfiere calor entre un medio caliente y un frío, por regla general se trata de fluidos. (12)

2. Tipos básicos de intercambiadores de calor. Existen tres tipos básicos de intercambiadores de calor:

Recuperadores: En este tipo de intercambiador de calor los fluidos caliente y frío están separados por una pared y el calor se transfiere mediante una combinación de convección hacia y desde la pared y de conducción a través de ella. La pared puede incluir superficies extendidas, tales como aletas, u otros dispositivos que favorecen la transferencia de calor. (12)

Regeneradores: En un regenerador, los fluidos caliente y frío ocupan el mismo espacio en el núcleo del intercambiador. El núcleo del intercambiador, o “matriz”, funciona como un almacén de calor que es calentado periódicamente por el de mayor temperatura de los dos fluidos y luego transfiere ese calor al fluido de menor temperatura. En una configuración de matriz fija, los fluidos caliente y frío pasan a través de un intercambiador estacionario de forma alternada, y para tener una operación continua se requieren dos o más matrices. (12)

Intercambiadores de calor de contacto directo: En este tipo de intercambiador de calor los fluidos caliente y frío se ponen en contacto entre sí de manera directa. Un ejemplo de esta clase de dispositivo en una torre de enfriamiento en la que un rocío de agua que cae en la parte superior de la torre entra en contacto directo con y es enfriado por una corriente de aire que fluye hacia arriba. Otros sistemas de contacto directo utilizan líquidos inmiscibles o un intercambio de sólido a gas. (12)

3. Intercambiador de tubos y casco. La configuración más simple de este tipo de intercambiador de calor consiste en un tubo dentro de otro. Una operación como esta puede operarse en contraflujo o en flujo paralelo, con el fluido caliente o el frío circulando a través del espacio anular y el otro por dentro del tubo interno. Un tipo más común de intercambiador de calor muy utilizado en la industria es la configuración de casco y tubos. En este tipo de intercambiador de calor, un fluido circula por el interior de los tubos mientras que el otro es forzado a través del casco y sobre la superficie externa de los tubos. Se hace que el fluido circule sobre los tubos y no a lo largo de ellos porque con flujo transversal se logra

un coeficiente de transferencia de calor mayor que con un flujo paralelo a los tubos. Para lograr un flujo transversal en el casco, se colocan desviadores en su interior. (12)

En algunas aplicaciones, el tamaño y peso del intercambiador de calor son de primordial importancia, especialmente en los intercambiadores de calor donde uno o ambos fluidos son gaseosos, pues los coeficientes de transferencia de calor en el lado del gas son pequeños lo que provoca que se requieran áreas grandes para la transferencia del calor. Los intercambiadores de calor compactos son diseños que cuentan con grandes áreas para la transferencia de calor en un espacio tan pequeño como sea posible. Los usos que requieren intercambiadores de calor compactos incluyen un núcleo calentador automotriz en el cual se hace circular el refrigerante del motor a través de tubos y el aire del compartimiento de los pasajeros se hace pasar por la superficie aletada exterior de los tubos y los condensadores del refrigerador, donde el refrigerante circula por el interior de tubos y es enfriado por el aire de la habitación que circula sobre la parte aletada exterior de los tubos. (12)

C. Deshidratación del tomate

Este producto es la parte comestible del tomate, sin la presencia de semillas, cortado en rebanadas, las cuales se someten a los procesos de deshidratación hasta niveles que permitan su estabilidad (3-5%). Los tomates dedicados para la deshidratación deberán estar sanos, maduros (en pleno color rojo) y de consistencia dura. (19)

1. Proceso general de deshidratación

Lavado y selección: se utilizan tomates sanos, maduros y de consistencia firme, que serán lavados en agua potable. (19)

Troceado: La primera operación que se realiza es la eliminación del pedúnculo, para luego cortarlos longitudinalmente en 8 partes. (19)

Desemillado: Durante el proceso de troceado las semillas y el jugo se liberan fácilmente. Las semillas se pueden separar con la ayuda de un colador y se pueden secar por separado. (19)

Escaldado: Los trozos del tomate se sumergen en agua mas azúcar (15%) hirviendo por 1-2 minutos. La presencia del azúcar es para mantener la estabilidad osmótica, del nivel de azúcar presente en el tomate. (19)

Enfriamiento: Inmediatamente los trozos se sumergen en agua fría o al medio ambiente para evitar el exceso de ablandamiento y luego se escurren. (19)

Escurrido y acomodo: Los trozos se escurren y se disponen en las bandejas que tengan mallas plásticas o de acero inoxidable. Se debe evitar amontonar los trozos y deberán estar dispuestos en una sola capa. (19)

Secado: Si se utiliza secador solar, los controles del proceso, son menores. Se debe evitar los excesos de calor y sobre todo la protección a la lluvia y a la humedad del medio ambiente externo. Si se utiliza secadores por aire caliente la temperatura del aire no debe sobrepasar los 60° C y una velocidad del viento de 3-5 m/s El secado termina cuando los trozos de tomate están quebradizos (cuya humedad es de 5-7%). (19)

Enfriado y empaque: Generalmente los trozos secos están por encima de la temperatura del medio ambiente por lo tanto se debe dejar que se enfríe hasta esa temperatura para luego empacar en

recipientes generalmente de plástico que no deje pasar la humedad (polipropileno, celofán o laminados plásticos) y/o en envases laminados metálicos.(19)

Almacenamiento: Se deben almacenar en un ambiente fresco y seco y protegido de la luz.(19)

Los procesos de deshidratación del tomate y de las frutas en general, se deben adaptar al uso final que se le quiere dar al producto. El proceso de secado natural descrito anteriormente se le puede agregar el proceso de molienda para obtener una harina o concentrado seco de tomate, muy utilizado en la preparación de salsas. El tomate deshidratado natural en trozos, permite utilizarlo en preparaciones culinarias como ingrediente sólido. Sin embargo para mantener una característica de fruta deshidratada tipo “pasa” para incorporarlo en la preparación de mermeladas y compotas de tomate con presencia de trozos de fruta, es necesario realizar un proceso osmótico de secado (sumergimiento de los trozos en un almíbar de 60% de azúcar por dos horas o más) para luego realizar un secado por aire caliente hasta una humedad del 20%. (19)

D. Métodos de secado de cebolla

Se puede utilizar secado por aire y secado por aspersión. El exterior de la cebolla por deshidratar debe estar seco. Después de lavado se cortan los extremos, se eliminan las pieles por abrasión o por flameado. Los desperdicios se eliminan por inmersión en agua. Las cebollas se rebanan en sentido vertical a su eje; las rebanadas deben tener un grosor de 5 mm. (18)

La deshidratación se inicia a una temperatura de 70°C y se debe bajar a 60°C durante el proceso. Las rodajas secas se separan y clasifican según el tamaño, las rebanadas pequeñas y quebradas se elaboran en polvo moliéndolas. La cebolla también puede secarse por Spray; en este método las cebollas son lavadas y molidas al tamaño adecuado hasta obtener un puré, el cual se mezcla con un 30-40% en peso con dextrinas para mejorar las características del secado. Luego se introduce en un secador Spray a aproximadamente 68°C por 4 minutos. El polvo obtenido por este proceso es alrededor de un 20% más fuerte en su sabor. (18)

Materias primas para deshidratar: se utilizan las cebollas de la variedad Yellow Granex y según estudios preliminares debe utilizarse también harina de arroz. (18)

Lavado y pelado: las cebollas se lavan con suficiente agua clorada (7 ppm de cloro) y se eliminan las hojas externas en forma manual. (18)

Despuntado: las cebollas lavadas son despuntadas de ambos extremos en forma manual con la ayuda de un cuchillo. (18)

Troceado: se trocean en cuartos de pulgadas para obtener cubos de cebolla. (18)

Molienda: se hacen pasar los cubos a través de un molino de martillos. (18)

Mezclado: la cebolla molida es mezclada en forma manual con harina de arroz en una proporción de 80:20 base seca (97:3 base húmeda). (18)

Secado: Si es por aire caliente se utiliza una secadora de bandejas, con aire caliente forzado en contracorriente. La mezcla se deposita en bandejas de aluminio con una carga de 1.5 kg de producto húmedo por bandeja. El secado se realiza a una temperatura promedio de 68°C. Si el secado se hace por tambores, la mezcla se hace pasar a través de un secador de doble tambor. Se utiliza una presión de 50 lb/plg², a una velocidad de tambores de 2 rpm y una distancia entre tambores de 0.127 mm. (18)

Molienda: para obtener un producto en polvo, se hace pasar el producto seco obtenido por cada uno de los secadores, a través de un molino de martillos. (18)

E. Perejil deshidratado

El perejil, sin duda la hierba de uso más común en la cocina europea y americana, es una hortaliza bianual originaria de los países que rodean el Mediterráneo Oriental. Su nombre científico es *Petroselinum sativum* Hoffm., posee otros sinónimos latinos tales como, *Petroselinum crispum* (Mill.) Nyman ex A. W. Hill empleado en las normas AFNOR (Iteipmai, 1989), *Apium petroselinum* L. o *Carum petroselinum* (L.) Benth. and Hook. o *Petroselinum hortense* Hoffm. (Simon, 1984). Se mencionan diversas variedades botánicas, como *P. sativum* var. *tuberosum* denominado perejil de raíz; *P. sativum* var. *crispum* o perejil crespo y *P. sativum* var. *latifolium* o perejil liso. (17)

El perejil liso posee folíolos lisos y grandes, de color verde oscuro y sabor intenso, se emplea como materia prima para la agroindustria del deshidratado. Las hojas están integradas por el limbo generalmente triangular, muy dividido con lóbulos cuneiformes dentados de color verde oscuro y por un largo tallo (10 a 20 cm), liso en la base (Dimitri, 1988). El rendimiento comercial del perejil deshidratado está conformado por los folíolos exclusivamente, los pecíolos constituyen el residuo de esta producción y no tienen valor económico pudiéndose restituir al campo como aporte de materia orgánica. (17)

Es un alimento altamente nutritivo y valioso pues contiene vitaminas A, B (B1 y B2) y C, grandes cantidades de hierro, calcio, potasio, fósforo, etc. (Infoagro, 2001); también se le reconocen variados usos medicinales, “empleado como antiespasmódico, carminativo, diurético y emenagogo”(Simon, 1984). (17)

Los precios y los niveles de producción del perejil deshidratado lo convierten en una alternativa interesante de diversificación en la medida que se cuente con equipos de deshidratación apropiados, dado su muy elevado contenido de humedad (entre el 85 y 90%, según condiciones de humedad imperantes durante el momento de corte). (17)

III. JUSTIFICACIÓN

La deshidratación de los alimentos ha sido uno de los métodos más antiguos de conservación. El secado se utilizaba ya en la prehistoria para conservar numerosos alimentos. Hoy en día existen muchas empresas que se dedican a la deshidratación de alimentos, siendo ésta una de las ramas más importantes en la industria de los alimentos. Los consumidores pueden encontrar numerosos productos deshidratados a su disposición, los cuales ofrecen ventajas en cuanto a su manejo y características sensoriales. La ventaja consiste en que un alimento deshidratado ofrece características sensoriales similares a las del alimento original, además es un producto que tiene una vida útil mucho más larga, ya que se preserva durante un tiempo más prolongado. La deshidratación es entonces una herramienta muy ventajosa y muy utilizada en la industria de los alimentos.

El método tradicional utilizado en la industria para deshidratar un alimento utiliza energía térmica para arrastrar el agua que contiene el producto. Es decir que se necesita aire caliente que entre en contacto con el alimento. Esto implica que se debe calentar el aire, lo cual representa un costo energético. Para calentar el aire se puede emplear energía de combustión o energía eléctrica. Existen también equipos de deshidratación solar que utilizan energía proveniente del sol para llevar a cabo la deshidratación.

Los altos precios de los combustibles y la energía eléctrica, así como la creciente conciencia hacia el ahorro energético son una de las razones por la cual en la industria de los alimentos se tiene cada vez más interés en el diseño de equipos energéticamente eficientes.

Este trabajo tiene como propósito el diseño de un deshidratador de bandejas y un intercambiador de calor que aprovecha el calor de las chimeneas de combustión de hornos de gas propano. Los hornos de gas propano utilizan la energía de la combustión del gas para calentar el interior del horno y así llevar a cabo el proceso térmico para el cual está intencionado el equipo. Sin embargo una gran parte del calor de la combustión se pierde por las chimeneas, ya que los gases de combustión del gas propano salen de estas mismas a altas temperaturas. El calor que contienen los gases representa energía muy valiosa que de ser aprovechada podría representar una eficiencia energética para el equipo. Con el diseño del deshidratador y el intercambiador de calor se tiene como propósito utilizar esta energía y así evitar que se pierda. El intercambiador de calor transfiere la energía térmica que contienen los gases de combustión hacia el aire que se introduce en el deshidratador de bandejas. De esta manera se obtiene aire caliente para llevar a cabo el proceso de deshidratado.

El proceso de deshidratado para este equipo resulta de bajo costo, ya que el único gasto es la energía que se necesita para movilizar el aire a través del intercambiador hacia el interior del deshidratador. La energía térmica se obtiene gratuitamente de los gases de combustión que se escapan de los hornos, obteniendo así un deshidratador altamente eficiente.

IV. OBJETIVOS

A. General

Diseñar un deshidratador de bandejas y un intercambiador de calor con el fin de aprovechar el calor perdido de las chimeneas de hornos de gas propano y así utilizarlo como fuente energética para el proceso de deshidratado.

B. Específicos

1. Diseñar y construir un intercambiador de calor de tubos.
2. Diseñar y construir un deshidratador de bandejas que se pueda adaptar al intercambiador de calor.
3. Instalar el equipo diseñado sobre los hornos de una panadería local para proporcionar un equipo de deshidratado de tomate, perejil y cebolla.
4. Determinar la factibilidad del aprovechamiento del calor recuperado mediante pruebas de deshidratado de tomate, perejil y cebolla.
5. Realizar pruebas de secado para los productos, variando las configuraciones de diseño del equipo instalado.
6. Evaluar las propiedades físicas de los productos frescos y deshidratados.

V. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Materiales

1. Materiales de construcción del intercambiador de calor y cámara de deshidratado. Se llevará a cabo la construcción de un intercambiador de calor y una cámara de deshidratado utilizando materiales adquiridos en ferreterías localizadas en la ciudad de Guatemala.

a. Materiales de construcción del intercambiador de calor

1) Tubo exterior del intercambiador de calor

- El material deberá resistir las altas temperaturas de los gases de combustión de los hornos y deberá ser suficientemente rígido para mantener la estructura del intercambiador de calor.
- El material que se utilizará para construir el tubo exterior del intercambiador de calor es de lámina galvanizada de 17 pulgadas de diámetro.

2) Tubos del interior del intercambiador de calor

- Se utilizarán tubos de cobre rígido de (7/8) de pulgada de diámetro interno.
- Los tubos de cobre tendrán un largo de 3 metros.
- En total se colocarán 5 tubos de cobre dentro del intercambiador de calor.

3) Ventilador de aire. Se utilizará un ventilador extractor de aire de (1/60) HP para movilizar el aire dentro del intercambiador de calor. También se harán pruebas con un ventilador de 12 voltios de 1/200 HP.

b. Materiales de construcción del deshidratador de bandejas

1) Cámara de deshidratado. Se utilizará un caja de aluminio equipada con material aislante de dimensiones internas de (0.55m) x (0.30 m) x (0.45m).

- El material aislante de la caja de deshidratado será Duroport.
- La caja contendrá bandejas de aluminio, perforadas construidas con malla mesh 10.
- En total se colocarán 7 bandejas dentro de la caja de deshidratado.
- Resistencia eléctrica auxiliar de 1100 Watts.
- Regulador de corriente marca Harper-Wyman de 120 Voltios y 15 Amperios.

2. Alimentos para deshidratar

a. Tomate

- Las pruebas de deshidratado se llevarán a cabo con tomates cortados en cuatro unidades o en rodajas de 1 cm de grosor. Los tomates para la deshidratación deberán estar sanos, maduros (en pleno color rojo) y de consistencia dura. (19) Se utilizarán tomates de diversas variedades, obtenidas en mercados locales.

b. Cebolla

- Las pruebas de deshidratado se llevarán a cabo con cebollas maduras contadas en rodajas. Las cebollas se utilizan rebanadas en sentido vertical a su eje con un grosor de 5 mm. (18)

c. Perejil

- Las pruebas de deshidratado se llevarán a cabo con perejil fresco sin tallo.

3. Reactivos

- a. Blanqueado. Agua y azúcar

4. Equipo de medición

a. Balanzas. Para pesar las muestras frescas y deshidratadas se utilizan balanzas marca Tecnipesa, con una precisión de $\pm 1\text{g}$.

b. Termómetros. Se utilizarán termómetros digitales marca Precision para medir la temperatura de la cámara de deshidratado con una precisión de $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

c. Logger de temperatura. Se utilizará un Logger marca Omega para registrar la temperatura de la cámara de deshidratado.

d. Balanza de humedad. Se utilizará una balanza de humedad propiedad de la Universidad del Valle de Guatemala para determinar la humedad en el producto original y el deshidratado.

B. Métodos

1. Fabricación del deshidratador. Se debe construir el intercambiador de calor y la cámara de deshidratado utilizando los materiales mencionados anteriormente. La construcción se llevará a cabo en el taller de la empresa Délica S.A. El equipo construido se colocará sobre las chimeneas de los hornos de la panadería de la empresa mencionada.

El intercambiador de calor se coloca directamente sobre las chimeneas de los hornos para poder captar los gases calientes que escapan hacia la atmósfera. La cámara de deshidratado se coloca a un costado del intercambiador de calor y se conecta a este con tubos aislados para poder recibir el aire caliente que sale del intercambiador de calor.

En la figura 3 del Anexo se proporciona un diagrama esquemático que ilustra el diseño del deshidratador y el intercambiador instalado sobre las chimeneas de los hornos de gas. La construcción del equipo puede estar sujeta a algunos cambios respecto al diseño presentado en la figura 3 del Anexo debido a circunstancias que podrían surgir en el momento del armado del equipo. Además, la figura 3 representa un diseño preliminar, el cual puede ser modificado para poder cumplir con uno de los objetivos del trabajo de investigación, el cual consiste en las pruebas de secado para los productos variando las configuraciones de diseño del equipo instalado.

2. Condiciones de uso del deshidratador fabricado. Se llevarán a cabo pruebas de deshidratado de tomate, cebolla y perejil en el deshidratador fabricado. Para que el deshidratador funcione deben trabajar los hornos de pan. En la panadería en donde se colocará el sistema se cuenta con tres hornos de pan. El equipo de deshidratado se instalará sobre la chimenea de los tres hornos. Estos mismos trabajan durante un promedio de 8 horas diarias para hornear el pan. En el momento en que se hornea el pan se escapa gas de combustión caliente a través de las chimeneas en donde se encuentra instalado el intercambiador de calor. Este calor se perdería normalmente hacia la atmósfera, sin embargo el intercambiador de calor instalado utilizará esta energía térmica para calentar el aire que se necesita para deshidratar los productos. Para que funcione el sistema de deshidratado debe trabajar al menos uno de los tres hornos de pan.

3. Pruebas de deshidratado de tomate

- Lavar los tomates para eliminar cualquier material extraño.
- Introducir los tomates en una solución de agua con cloro a 10 ppm para llevar a cabo la desinfección.
- Lavar y escurrir los tomates con agua limpia.
- Cortar el tomate en cuatro pedazos de peso similar o en rodajas de 1 cm de grosor.
- Guardar algunas muestras de material fresco para su posterior determinación de humedad.
- Los trozos del tomate se sumergen en agua con azúcar (15%) hirviendo por 1-2 minutos. La presencia del azúcar es para mantener la estabilidad osmótica, del nivel de azúcar presente en el tomate.
- Sacar del agua hirviendo y sumergir en agua fría limpia.
- Distribuir uniformemente el producto alimenticio que va a ser secado entre las bandejas y anotar el peso inicial.
- Colocar el Logger de temperatura dentro del deshidratador.
- Tomar mediciones de peso del producto a intervalos de 4 horas.
- Se sigue con el experimento hasta que se alcance el contenido de humedad deseado.
- Una vez completadas las etapas anteriores, tomar una muestra del material seco para la determinación de su humedad.
- Anotar el peso final del tomate deshidratado.
- Registrar el tiempo necesario para el deshidratado. (3)

4. Pruebas de deshidratado de cebolla

- Lavar las cebollas para eliminar cualquier material extraño.
- Introducir las cebollas en una solución de agua con cloro a 10 ppm para llevar a cabo la desinfección.
- Lavar y escurrir las cebollas con agua limpia.
- Rebanar las cebollas en sentido vertical a su eje con un grosor de 5 mm (la forma debe ser bien definida ya que se debe calcular el área de cada muestra.)
- Guardar algunas muestras de material fresco para su posterior determinación de humedad.
- Las rodajas de cebolla se sumergen en agua hirviendo por 1-2 minutos.
- Sacar del agua hirviendo y sumergir en agua fría limpia
- Distribuir uniformemente el producto alimenticio que va a ser secado entre las bandejas y anotar el peso inicial.
- Colocar el Logger de temperatura dentro del deshidratador.
- Tomar mediciones de peso del producto a intervalos de 4 horas.
- Se sigue con el experimento hasta que se alcance el contenido de humedad deseado.
- Una vez completadas las etapas anteriores, tomar una muestra del material seco para la determinación de su humedad.
- Anotar el peso final de la cebolla deshidratada.
- Registrar el tiempo necesario para el deshidratado. (3)

5. Pruebas de deshidratado del perejil

- Lavar el perejil para eliminar cualquier material extraño.
- Introducir el perejil en una solución de agua con cloro a 10 ppm para llevar a cabo la desinfección.
- Lavar y escurrir el perejil con agua limpia.
- Eliminar el tallo del perejil y utilizar las hojas frescas para el experimento.
- Colocar el perejil en un colador y sumergirlo en agua hirviendo durante 30 segundos.
- Sacar del agua hirviendo y sumergir en agua fría limpia.
- Guardar algunas muestras de material fresco para su posterior determinación de humedad.
- Distribuir uniformemente el producto alimenticio que va a ser secado entre las bandejas y anotar el peso inicial.
- Colocar el Logger de temperatura dentro del deshidratador.
- Tomar mediciones de peso del producto a intervalos de 4 horas.
- Se sigue con el experimento hasta que se alcance el contenido de humedad deseado.
- Una vez completadas las etapas anteriores, tomar una muestra del material seco para la determinación de su humedad.
- Anotar el peso final del perejil deshidratado.
- Registrar el tiempo necesario para el deshidratado. (3)

6. Realización de pruebas de secado para los productos, variando las configuraciones de diseño del equipo instalado. Para lograr que el equipo funcione con la mayor eficiencia posible se llevarán a cabo pruebas con diferentes configuraciones de diseño. Las variaciones de diseño incluyen:

- a. Uso de energía térmica proveniente del intercambiador de calor.
- b. Uso de energía térmica proveniente de la resistencia eléctrica.
- c. Uso simultáneo de ambas fuentes de calor.
- d. Diferentes velocidades de aire y posicionamiento de los ventiladores de extracción y recirculación.

El fin de estas pruebas es determinar el diseño que mejor se adapte al uso eficiente del calor proveniente del intercambiador, ya que de esta manera se hace más factible el uso del equipo para el aprovechamiento del calor perdido de las chimeneas de los hornos de pan.

Las pruebas de variación de diseño del equipo se llevarán a cabo utilizando como producto alimenticio el tomate cortado en rodajas. No se utilizarán los otros productos ya que cada alimento exhibe diferente comportamiento de deshidratado, lo cual interfiere con la interpretación de los resultados de la variación de configuración de equipo.

Para las pruebas se utilizarán 16 lb de tomate fresco. El procedimiento de preparación del tomate se lleva a cabo de la manera en que se describe en el punto 3 de la sección de Métodos.

7. Determinación de factibilidad del aprovechamiento del calor recuperado mediante pruebas de deshidratado de tomate, perejil y cebolla. En este trabajo de investigación se tiene como propósito averiguar la factibilidad del uso de calor recuperado para llevar a cabo el proceso de deshidratación. Como se trata de un trabajo de investigación, se deben hacer pruebas para saber si el calor recuperado por el intercambiador de calor es suficiente como para llevar a cabo el proceso completo de

deshidratado. La caja de deshidratado cuenta con un sistema auxiliar de generación de temperatura mediante una resistencia eléctrica de temperatura variable. Esta resistencia se usará en el caso que el calor proporcionado por el intercambiador no sea suficiente como para llevar a cabo el proceso completo de deshidratado. Las pruebas de deshidratado se llevarán a cabo utilizando el calor proporcionado por el intercambiador de calor. En el momento en que se termine de usar los hornos de pan (los hornos funcionan durante un promedio de 8 horas diarias) se procederá a evaluar el estado del producto deshidratado. En caso que no se encuentre deshidratado al nivel deseado, se procederá a encender la resistencia eléctrica para continuar con el proceso. La idea principal de este equipo consiste en utilizar lo menos posible la resistencia y así poder ahorrar el costo de energía eléctrica. La factibilidad del uso del calor recuperado por el intercambiador se verá reflejada en las pruebas que se realizarán y se medirá en base al nivel de deshidratado que se puede llegar a obtener utilizando solamente el calor recuperado por el intercambiador. Para cada lote de producto se tomará el tiempo que se utiliza el calor del intercambiador y el de la resistencia eléctrica. También se harán evaluaciones de desempeño del equipo, ya que se medirá la temperatura interna del deshidratador utilizando el calor del intercambiador, de la resistencia eléctrica y de la combinación de ambas fuentes.

8. Determinación de propiedades físicas de los productos frescos y deshidratados.

a. Determinación de humedad. Se llevarán a cabo pruebas de humedad del tomate, cebolla y perejil antes de llevar a cabo las pruebas de deshidratado. Se trabajará en triplicado con la balanza de humedad propiedad de la Universidad del Valle de Guatemala.

Se llevarán a cabo pruebas de humedad de las muestras del tomate, cebolla y perejil obtenidos en los intervalos de cada 4 horas de proceso de deshidratado.

Todas estas pruebas se llevarán a cabo una vez se haya establecido cuál es la configuración de diseño más eficiente para el equipo (el punto 6 de la sección de Métodos).

b. Peso. Se llevará un control del peso de las muestras del tomate, cebolla y perejil obtenidos en los intervalos de cada 4 horas de proceso de deshidratado. Todas estas pruebas se llevarán a cabo una vez se haya establecido cuál es la configuración de diseño más eficiente para el equipo (el punto 6 de la sección de Métodos).

VI. RESULTADOS

A. Propiedades del deshidratador variando las configuraciones de diseño.

Se determinó la temperatura del interior del deshidratador de bandejas en tres distintos lugares, la bandeja localizada en el punto más alto, una bandeja posicionada en el centro del equipo y la bandeja localizada en el punto más bajo. Se trabajó en triplicado.

Tabla 1: Utilizando resistencia eléctrica (potencia media-alta), sin ventilador

Localización dentro del deshidratador	Temperatura		
	Bandeja inferior	Mayor a 200 °C ± 0.5°C	Mayor a 200 °C ± 0.5°C
Bandeja intermedia	145 °C ± 0.5°C	145 °C ± 0.5°C	148 °C ± 0.5°C
Bandeja superior	110 °C ± 0.5°C	110 °C ± 0.5°C	111 °C ± 0.5°C

Consumo eléctrico de la resistencia: 400 Watts

Consumo eléctrico del ventilador: 0 Watts

Consumo Total: 400 Watts

Tabla 2: Utilizando Horno 1, extractor de (1/60) HP posicionado en la parte superior del deshidratador.

Localización dentro del deshidratador	Temperatura		
	Bandeja inferior	46 °C ± 0.5°C	44 °C ± 0.5°C
Bandeja intermedia	43 °C ± 0.5°C	45 °C ± 0.5°C	45 °C ± 0.5°C
Bandeja superior	42 °C ± 0.5°C	44 °C ± 0.5°C	44 °C ± 0.5°C

Consumo eléctrico de la resistencia: 0 Watts

Consumo eléctrico del ventilador: 100 Watts

Consumo Total: 100 Watts

Tabla 3: Utilizando Horno 1, extractor de 12V 0.16Amp posicionado en la parte superior del deshidratador.

Localización dentro del deshidratador	Temperatura		
	Bandeja inferior	42 °C ± 0.5°C	42 °C ± 0.5°C
Bandeja intermedia	39 °C ± 0.5°C	39 °C ± 0.5°C	40 °C ± 0.5°C
Bandeja superior	37 °C ± 0.5°C	36 °C ± 0.5°C	37 °C ± 0.5°C

Consumo eléctrico de la resistencia: 0 Watts

Consumo eléctrico del ventilador: 2 Watts

Consumo Total: 2 Watts

Tabla 4: Utilizando Horno 1, Horno 2, Horno 3, extractor de (1/60) HP posicionado en la parte superior del deshidratador.

Localización dentro del deshidratador	Temperatura		
Bandeja inferior	60 °C ± 0.5°C	60 °C ± 0.5°C	60 °C ± 0.5°C
Bandeja intermedia	54 °C ± 0.5°C	56 °C ± 0.5°C	52 °C ± 0.5°C
Bandeja superior	49 °C ± 0.5°C	49 °C ± 0.5°C	50 °C ± 0.5°C

Consumo eléctrico de la resistencia: 0 Watts

Consumo eléctrico del ventilador: 100 Watts

Consumo Total: 100 Watts

Tabla 5: Utilizando Horno 1, Horno 2, Horno 3, extractor de 12V 0.16Amp posicionado en la parte superior del deshidratador.

Localización dentro del deshidratador	Temperatura		
Bandeja inferior	55 °C ± 0.5°C	54 °C ± 0.5°C	55 °C ± 0.5°C
Bandeja intermedia	50 °C ± 0.5°C	51 °C ± 0.5°C	51 °C ± 0.5°C
Bandeja superior	44 °C ± 0.5°C	45 °C ± 0.5°C	44 °C ± 0.5°C

Consumo eléctrico de la resistencia: 0 Watts

Consumo eléctrico del ventilador: 2 Watts

Consumo Total: 2 Watts

Tabla 6: Utilizando Horno 1, resistencia eléctrica (media potencia), extractor de (1/60) HP posicionado en la parte superior del deshidratador.

Localización dentro del deshidratador	Temperatura		
Bandeja inferior	79 °C ± 0.5°C	81 °C ± 0.5°C	84 °C ± 0.5°C
Bandeja intermedia	77 °C ± 0.5°C	74 °C ± 0.5°C	76 °C ± 0.5°C
Bandeja superior	75 °C ± 0.5°C	72 °C ± 0.5°C	73 °C ± 0.5°C

Consumo eléctrico de la resistencia: 333 Watts

Consumo eléctrico del ventilador: 100 Watts

Consumo Total: 433 Watts

Tabla 7: Utilizando Horno 1, resistencia eléctrica (potencia baja), extractor de 12V 0.16Amp posicionado en la parte superior del deshidratador.

Localización dentro del deshidratador	Temperatura		
Bandeja inferior	87 °C ± 0.5°C	89 °C ± 0.5°C	90 °C ± 0.5°C
Bandeja intermedia	74 °C ± 0.5°C	74 °C ± 0.5°C	74 °C ± 0.5°C
Bandeja superior	73 °C ± 0.5°C	72 °C ± 0.5°C	72 °C ± 0.5°C

Consumo eléctrico de la resistencia: 160 Watts

Consumo eléctrico del ventilador: 2 Watts

Consumo Total: 162 Watts

Tabla 8: Utilizando Horno 1, Horno 2, Horno 3, resistencia eléctrica (media potencia), extractor de (1/60) HP posicionado en la parte superior del deshidratador.

Localización dentro del deshidratador	Temperatura		
Bandeja inferior	81 °C ± 0.5°C	80 °C ± 0.5°C	80 °C ± 0.5°C
Bandeja intermedia	76 °C ± 0.5°C	79 °C ± 0.5°C	79 °C ± 0.5°C
Bandeja superior	74 °C ± 0.5°C	74 °C ± 0.5°C	74 °C ± 0.5°C

Consumo eléctrico de la resistencia: 333 Watts

Consumo eléctrico del ventilador: 100 Watts

Consumo Total: 433 Watts

Tabla 9: Utilizando Horno 1, Horno 2, Horno 3, resistencia eléctrica (potencia baja), extractor de 12V 0.16Amp posicionado en la parte superior del deshidratador.

Localización dentro del deshidratador	Temperatura		
Bandeja inferior	99 °C ± 0.5°C	103 °C ± 0.5°C	104 °C ± 0.5°C
Bandeja intermedia	92 °C ± 0.5°C	92 °C ± 0.5°C	90 °C
Bandeja superior	74 °C ± 0.5°C	76 °C ± 0.5°C	76 °C

Consumo eléctrico de la resistencia: 160 Watts

Consumo eléctrico del ventilador: 2 Watts

Consumo Total: 162 Watts

Tabla 10: Utilizando resistencia eléctrica (potencia media-alta), extractor de (1/60) HP posicionado en la parte superior del deshidratador.

Localización dentro del deshidratador	Temperatura		
Bandeja inferior	65 °C ± 0.5°C	65 °C ± 0.5°C	65 °C ± 0.5°C
Bandeja intermedia	61 °C ± 0.5°C	60 °C ± 0.5°C	60 °C ± 0.5°C
Bandeja superior	57 °C ± 0.5°C	57 °C ± 0.5°C	57 °C ± 0.5°C

Consumo eléctrico de la resistencia: 400 Watts

Consumo eléctrico del ventilador: 100 Watts

Consumo Total: 500 Watts

Tabla 11: Utilizando resistencia eléctrica (media potencia), extractor de 12V 0.16Amp posicionado en la parte superior del deshidratador.

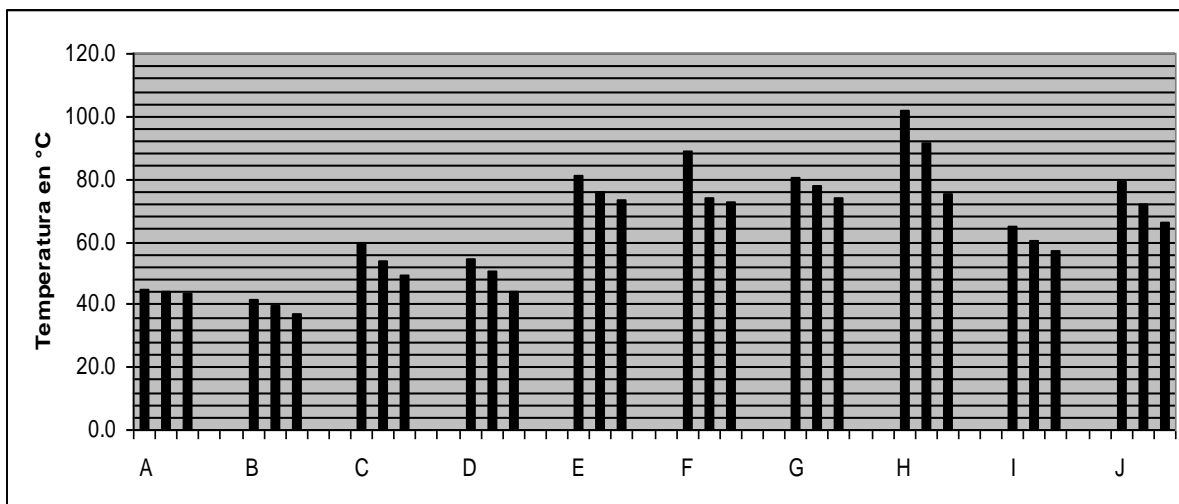
Localización dentro del deshidratador	Temperatura		
Bandeja inferior	79 °C ± 0.5°C	79 °C ± 0.5°C	79 °C ± 0.5°C
Bandeja intermedia	72 °C ± 0.5°C	72 °C ± 0.5°C	72 °C ± 0.5°C
Bandeja superior	66 °C ± 0.5°C	67 °C ± 0.5°C	66 °C ± 0.5°C

Consumo eléctrico de la resistencia: 333 Watts

Consumo eléctrico del ventilador: 2 Watts

Consumo Total: 335 Watts

Gráfica 1: Temperatura del deshidratador variando las configuraciones de diseño.



Donde,

A = Utilizando Horno 1, extractor de (1/60) HP posicionado en la parte superior del deshidratador.

B = Utilizando Horno 1, extractor de 12V 0.16Amp posicionado en la parte superior del deshidratador.

C = Utilizando Horno 1, Horno 2, Horno 3, extractor de (1/60) HP posicionado en la parte superior del deshidratador.

D = Utilizando Horno 1, Horno 2, Horno 3, extractor de 12V 0.16Amp posicionado en la parte superior del deshidratador.

E = Utilizando Horno 1, resistencia eléctrica (media potencia), extractor de (1/60) HP posicionado en la parte superior del deshidratador.

F = Utilizando Horno 1, resistencia eléctrica (potencia baja), extractor de 12V 0.16Amp posicionado en la parte superior del deshidratador.

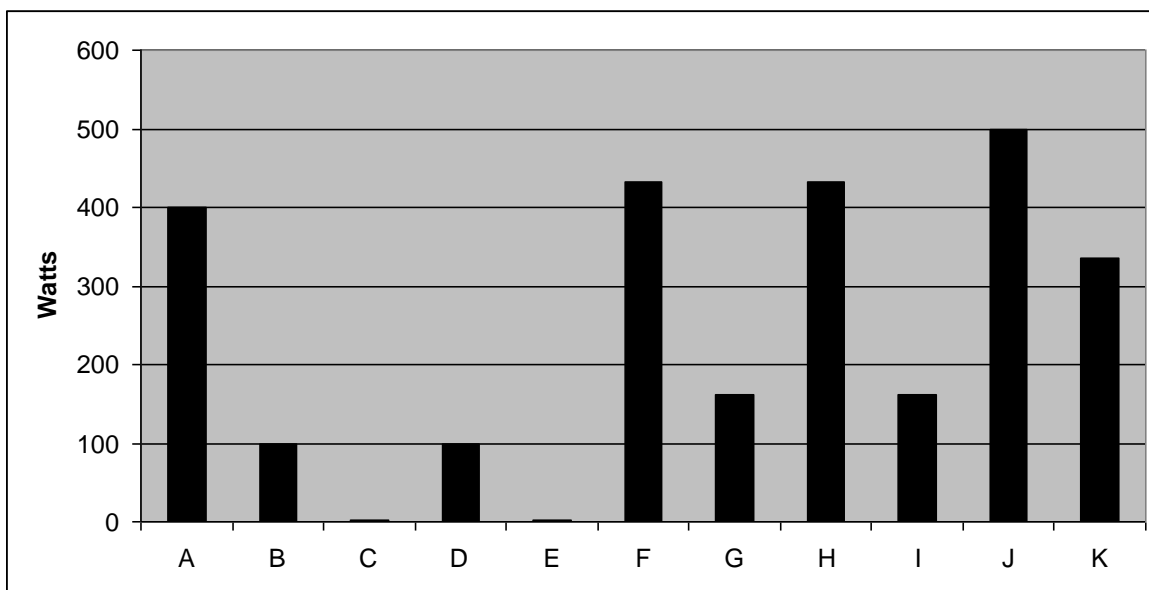
G = Utilizando Horno 1, Horno 2, Horno 3, resistencia eléctrica (media potencia), extractor de (1/60) HP posicionado en la parte superior del deshidratador.

H = Utilizando Horno 1, Horno 2, Horno 3, resistencia eléctrica (potencia baja), extractor de 12V 0.16Amp posicionado en la parte superior del deshidratador.

I = Utilizando resistencia eléctrica (potencia media-alta), extractor de (1/60) HP posicionado en la parte superior del deshidratador.

J = Utilizando resistencia eléctrica (media potencia), extractor de 12V 0.16Amp posicionado en la parte superior del deshidratador.

Gráfica 2: Consumo eléctrico de resistencia y ventilador variando las configuraciones de diseño.



Donde,

A = Utilizando resistencia eléctrica (potencia media-alta), sin ventilador

B = Utilizando Horno 1, extractor de (1/60) HP posicionado en la parte superior del deshidratador.

C = Utilizando Horno 1, extractor de 12V 0.16Amp posicionado en la parte superior del deshidratador.

D = Utilizando Horno 1, Horno 2, Horno 3, extractor de (1/60) HP posicionado en la parte superior del deshidratador.

E = Utilizando Horno 1, Horno 2, Horno 3, extractor de 12V 0.16Amp posicionado en la parte superior del deshidratador.

F = Utilizando Horno 1, resistencia eléctrica (media potencia), extractor de (1/60) HP posicionado en la parte superior del deshidratador.

G = Utilizando Horno 1, resistencia eléctrica (potencia baja), extractor de 12V 0.16Amp posicionado en la parte superior del deshidratador.

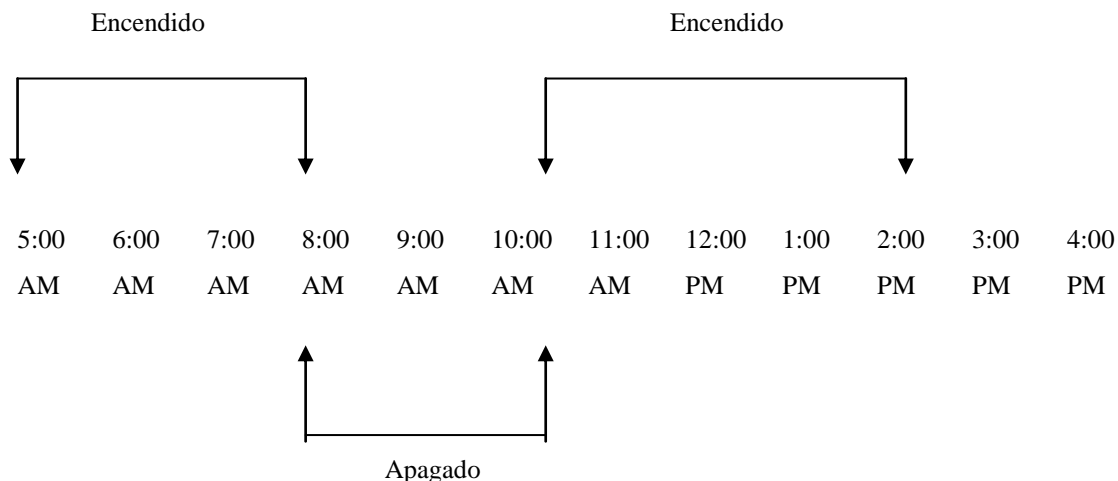
H = Utilizando Horno 1, Horno 2, Horno 3, resistencia eléctrica (media potencia), extractor de (1/60) HP posicionado en la parte superior del deshidratador.

I = Utilizando Horno 1, Horno 2, Horno 3, resistencia eléctrica (potencia baja), extractor de 12V 0.16Amp posicionado en la parte superior del deshidratador.

J = Utilizando resistencia eléctrica (potencia media-alta), extractor de (1/60) HP posicionado en la parte superior del deshidratador.

K = Utilizando resistencia eléctrica (media potencia), extractor de 12V 0.16Amp posicionado en la parte superior del deshidratador.

Gráfica 3: Tiempo de operación de hornos de gas propano de la panadería.



La panadería en la cual se instaló el equipo utiliza 6 horas y 30 minutos los hornos durante un día de trabajo. La información proporcionada por los encargados de la panadería indica que en un 60% de este tiempo se mantienen encendidos los tres hornos al mismo tiempo. El resto del tiempo permanece encendido solamente un horno. De 8:00 AM a 10:30 AM permanecen apagados los hornos.

Esto implica que los tres hornos permanecen encendidos durante un tiempo aproximado de 3 horas y 54 minutos. El tiempo en que se tiene solamente un horno en operación es de 2 horas y 36 minutos.

B. Cálculos teóricos del proceso de deshidratación:

Datos obtenidos del deshidratador:

Tabla 12: Velocidad de salida de aire

Ventilador	Velocidad
Ventilador de alta capacidad	27.0 km/h \pm 0.1 km/h
Ventilador de baja capacidad	9.1 km/h \pm 0.1 km/h

Tabla 13: Diámetro de salida de aire

Ubicación	Diámetro
Salida de aire superior	4.85 cm \pm 0.05 cm

Tabla 14: Temperatura de aire utilizando el ventilador de alta capacidad

Ubicación	Temperatura
Entrada de aire	65°C \pm 0.5°C
Salida de aire	43°C \pm 0.5°C

Tabla 15: Temperatura de aire utilizando el ventilador de baja capacidad

Ubicación	Temperatura
Entrada de aire	56°C \pm 0.5°C
Salida de aire	42°C \pm 0.5°C

Tabla 16: Humedad de los sólidos

Descripción	Humedad
Humedad inicial	92%
Humedad final	40%

Tabla 17: Temperatura de los sólidos

Descripción	Humedad
Temperatura inicial	25°C ± 0.5°C
Temperatura final	60°C ± 0.5°C

Tabla 18: Propiedades del aire

Descripción	Valor
Densidad del aire a la altura de 1500 metros sobre el nivel del mar	1.05 kg/m ³
Humedad relativa	70% ± 0.5%
Temperatura de bulbo seco	25°C ± 0.5°C

(20)

1. Cálculos para la configuración de diseño utilizando el ventilador de alta capacidad

Velocidad de salida del aire:

$$27 \frac{km}{h} \left(\frac{1h}{3600s} \right) \left(\frac{1000m}{1km} \right) = 7.5 \frac{m}{s}$$

Área:

$$4.85cm \left(\frac{1m}{100cm} \right) = 0.0485m$$

$$A = \pi(r^2)$$

$$A = \pi \left(\frac{0.0485}{2} \right)^2 = 0.001847m^2$$

Caudal de aire:

$$0.001847m^2 \left(\frac{7.5m}{s} \right) = 0.01385 \frac{m^3}{s}$$

$$0.01385 \frac{m^3}{s} \left(\frac{1.05kg}{m^3} \right) = 0.01455 \frac{kg_{aire}}{s}$$

$$0.01455 \frac{kg_{aire}}{s} \left(\frac{3600s}{1h} \right) = 52.37 \frac{kg_{aire}}{h}$$

Balance de masa:

$$w_s(Y_E - Y_S) = w'(X_S - X_E)$$

Donde

w_S , flujo de masa de sólidos (kg de sólidos secos / h)

w' , flujo de masa de aire (kg de aire seco / h)

Y_E , contenido inicial de humedad de sólidos (kg de agua / kg de sólido seco)

Y_S , contenido final de humedad de sólidos (kg de agua / kg de sólido seco)

X_E , contenido inicial de humedad del aire (kg de agua / kg de aire seco)

X_S , contenido final de humedad del aire (kg de agua / kg de aire seco)

Determinación de flujo de masa de aire:

Humedad de entrada de aire: 0.014 kg de agua / kg de aire seco.

Para determinar la humedad del aire se utilizó la tabla psicrométrica y los datos de humedad relativa y temperatura de bulbo seco.

$$w' = \frac{52.37 \frac{kg_{aire}}{h}}{(1 + 0.014)} = 51.65 \frac{kg_{aire_seco}}{h}$$

Determinación de flujo de masa de sólidos:

$$w_S = 7.2 \frac{kg_{tomate}}{12h} \left(\frac{8kg_{solido_seco}}{100kg_{tomate}} \right) = 0.048 \frac{kg_{solido_seco}}{h}$$

Determinación de humedad de sólidos:

$$Y_E = \frac{92kg_{agua}}{8kg_{solido_seco}} = 11.5 \frac{kg_{agua}}{kg_{solido_seco}}$$

$$Y_S = \frac{40kg_{agua}}{60kg_{solido_seco}} = 0.6667 \frac{kg_{agua}}{kg_{solido_seco}}$$

Cálculo de humedad final en el aire utilizando el balance de masa:

$$0.048 \frac{kg_{solido_seco}}{h} \left(11.5 \frac{kg_{agua}}{kg_{solido_seco}} - 0.6667 \frac{kg_{agua}}{kg_{solido_seco}} \right) = 51.65 \frac{kg_{aire_seco}}{h} \left(X_S - 0.014 \frac{kg_{agua}}{kg_{aire_seco}} \right)$$

$$X_S = 0.02407 \frac{kg_{agua}}{kg_{aire_seco}}$$

Determinación de temperatura de entrada utilizando el balance de energía:

Balance de energía:

$$Q_E + w'i_E + w_S h_E = Q_S + w'i_S + w_S h_S$$

Donde

Q_E , entrada de calor hacia el sistema

Q_S , salida de calor desde el sistema

i_E , entalpía del aire de entrada (kJ / kg de aire seco)

i_S , entalpía del aire de salida (kJ / kg de aire seco)

h_E , entalpía de los sólidos de entrada (kJ / kg de sólido seco)

h_S , entalpía de los sólidos de salida (kJ / kg de sólido seco)

$$i = s(T - T^*) + \lambda_0 X = (1 + 1.92X)(T - T^*) + \lambda_0 X$$

Donde

s , calor específico húmedo del aire, ((1 + 1.92) kJ / kg °C)

λ_0 , calor latente de evaporación del agua a 0°C. (2490 kJ / kg)

T , temperatura del aire (°C)

T^* , temperatura de referencia (generalmente 0°C)

$$h = (C_P)_S(T - T^*) + Y(C_P)_w(T - T^*)$$

Donde

$(C_P)_S$, calor específico de los sólidos (kJ / kg °C)

$(C_P)_w$, calor específico del agua en los sólidos (kJ / kg °C)

Determinación de entalpías del aire:

$$i_E = (1 + 1.92 * 0.014)(T - 0) + 2490 * 0.014 = 1.0269T + 34.86$$

$$i_S = (1 + 1.92 * 0.02407)(43 - 0) + 2490 * 0.02407 = 104.9215 \frac{kJ}{kg_{aire_seco}}$$

Determinación de entalpías de los sólidos:

El calor específico para los sólidos del tomate es 3.98 kJ / kg °C

El calor específico del agua del tomate se toma como 4.176 kJ / kg °C

$$h_E = 3.98(25 - 0) + 11.5 * 4.176(25 - 0) = 1300.1 \frac{kJ}{kg_{solido_seco}}$$

$$h_S = 3.98(60 - 0) + 0.6667 * 4.176(60 - 0) = 405.8483 \frac{kJ}{kg_{solido_seco}}$$

Determinación de temperatura de entrada utilizando el balance de energía:

Se considera que el deshidratador se encuentra térmicamente aislado, por lo que $Q_E = Q_S = 0$.

$$51.65(1.0269T + 34.86) + 0.048(1300.1) = 51.65(104.9215) + 0.048(405.8483)$$

Despejado T se obtiene que la temperatura de entrada de aire para llevar a cabo el proceso de deshidratado es:

$$T = 67.42^\circ C$$

Para llevar a cabo el proceso de deshidratado con el ventilador de alta capacidad se necesita que la temperatura del aire que entra al deshidratador sea de 67.42 °C. De esta manera es posible deshidratar 7.2 kg de tomate con 92% de humedad a 40% de humedad en un período de 12 horas.

2. Cálculos para la configuración de diseño utilizando el ventilador de baja capacidad

Velocidad de salida del aire:

$$9.1 \frac{km}{h} \left(\frac{1h}{3600s} \right) \left(\frac{1000m}{1km} \right) = 2.53 \frac{m}{s}$$

Área:

$$4.85cm \left(\frac{1m}{100cm} \right) = 0.0485m$$

$$A = \pi(r^2)$$

$$A = \pi \left(\frac{0.0485}{2} \right)^2 = 0.001847m^2$$

Caudal de aire:

$$0.001847m^2 \left(\frac{2.53m}{s} \right) = 0.00467 \frac{m^3}{s}$$

$$0.00467 \frac{m^3}{s} \left(\frac{1.05kg}{m^3} \right) = 0.00490 \frac{kg_{aire}}{s}$$

$$0.00490 \frac{kg_{aire}}{s} \left(\frac{3600s}{1h} \right) = 17.65 \frac{kg_{aire}}{h}$$

Balance de masa:

$$w_s(Y_E - Y_S) = w'(X_S - X_E)$$

Donde

w_s , flujo de masa de sólidos (kg de sólidos secos / h)

w' , flujo de masa de aire (kg de aire seco / h)

Y_E , contenido inicial de humedad de sólidos (kg de agua / kg de sólido seco)

Y_S , contenido final de humedad de sólidos (kg de agua / kg de sólido seco)

X_E , contenido inicial de humedad del aire (kg de agua / kg de aire seco)

X_S , contenido final de humedad del aire (kg de agua / kg de aire seco)

Determinación de flujo de masa de aire:

Humedad de entrada de aire: 0.014 kg de agua / kg de aire seco.

Para determinar la humedad del aire se utilizó la tabla psicrométrica y los datos de humedad relativa y temperatura de bulbo seco.

$$w' = \frac{17.65 \frac{kg_{aire}}{h}}{(1 + 0.014)} = 17.41 \frac{kg_{aire_seco}}{h}$$

Determinación de flujo de masa de sólidos:

$$w_S = 7.2 \frac{kg_{tomate}}{12h} \left(\frac{8kg_{solido_seco}}{100kg_{tomate}} \right) = 0.048 \frac{kg_{solido_seco}}{h}$$

Determinación de humedad de sólidos:

$$Y_E = \frac{92kg_{agua}}{8kg_{solido_seco}} = 11.5 \frac{kg_{agua}}{kg_{solido_seco}}$$

$$Y_S = \frac{40kg_{agua}}{60kg_{solido_seco}} = 0.6667 \frac{kg_{agua}}{kg_{solido_seco}}$$

Cálculo de humedad final del aire utilizando el balance de masa:

$$0.048 \frac{kg_{solido_seco}}{h} \left(11.5 \frac{kg_{agua}}{kg_{solido_seco}} - 0.6667 \frac{kg_{agua}}{kg_{solido_seco}} \right) = 17.41 \frac{kg_{aire_seco}}{h} \left(X_S - 0.014 \frac{kg_{agua}}{kg_{aire_seco}} \right)$$

$$X_S = 0.04387 \frac{kg_{agua}}{kg_{aire_seco}}$$

Determinación de temperatura de entrada utilizando el balance de energía:

Balance de energía:

$$Q_E + w'i_E + w_S h_E = Q_S + w'i_S + w_S h_S$$

Donde

Q_E , entrada de calor hacia el sistema

Q_S , salida de calor desde el sistema

i_E , entalpía del aire de entrada (kJ / kg de aire seco)

i_S , entalpía del aire de salida (kJ / kg de aire seco)

h_E , entalpía de los sólidos de entrada (kJ / kg de sólido seco)

h_S , entalpía de los sólidos de salida (kJ / kg de sólido seco)

$$i = s(T - T^*) + \lambda_0 X = (1 + 1.92X)(T - T^*) + \lambda_0 X$$

Donde

s , calor específico húmedo del aire, ((1 + 1.92) kJ / kg °C)

λ_0 , calor latente de evaporación del agua a 0°C. (2490 kJ / kg)

T , temperatura del aire (°C)

T^* , temperatura de referencia (generalmente 0°C)

$$h = (C_P)_S (T - T^*) + Y(C_P)_W (T - T^*)$$

Donde

$(C_P)_S$, calor específico de los sólidos (kJ / kg °C)

$(C_P)_W$, calor específico del agua en los sólidos (kJ / kg °C)

Determinación de entalpías del aire:

$$i_E = (1 + 1.92 * 0.014)(T - 0) + 2490 * 0.014 = 1.0269T + 34.86$$

$$i_S = (1 + 1.92 * 0.04387)(42 - 0) + 2490 * 0.04387 = 154.7740 \frac{kJ}{kg_{aire_seco}}$$

Determinación de entalpías de los sólidos:

El calor específico para los sólidos del tomate es 3.98 kJ / kg °C

El calor específico del agua del tomate se toma como 4.176 kJ / kg °C

$$h_E = 3.98(25 - 0) + 11.5 * 4.176(25 - 0) = 1300.1 \frac{kJ}{kg_{solido_seco}}$$

$$h_S = 3.98(60 - 0) + 0.6667 * 4.176(60 - 0) = 405.8483 \frac{kJ}{kg_{solido_seco}}$$

Determinación de temperatura de entrada utilizando el balance de energía:

Se considera que el deshidratador se encuentra térmicamente aislado, por lo que $Q_E = Q_S = 0$.

$$17.41(1.0269T + 34.86) + 0.048(1300.1) = 17.41(154.7740) + 0.048(405.8483)$$

Despejado T se obtiene que la temperatura de entrada de aire para llevar a cabo el proceso de deshidratado es:

$$T = 114.37^\circ C$$

Para llevar a cabo el proceso de deshidratado con el ventilador de baja capacidad se necesita que la temperatura del aire que entra al deshidratador sea de 114.37 °C. De esta manera es posible deshidratar 7.2 kg de tomate con 92% de humedad a 40% de humedad en un período de 12 horas.

C. Pruebas de secado variando las configuraciones del equipo

1. Prueba número 1. Descripción de configuración de diseño: se utilizó el ventilador de alta capacidad como extractor de aire, colocado en la parte superior del deshidratador de bandejas. Como fuente de calor se utilizó el aire proveniente del intercambiador. Se utilizaron tomates de tamaño mediano, cortados en rodajas de 2 cm de grosor. Durante el experimento se rotaron las bandejas para ayudar a mantener un secado uniforme. El tiempo total de secado para esta prueba fue de 24 horas.

Tabla 19: Tiempos de rotación de bandejas de prueba número 1.

Evento	Hora
Entrada de producto	1:00 PM
Primera rotación	9:00 PM
Segunda rotación	5:00 AM
Salida de producto	1:00 PM

Tabla 20: Resultados de peso para la prueba número 1

	Peso Total
Inicial	6405 g \pm 0.5 g
Final	210 g \pm 0.5 g

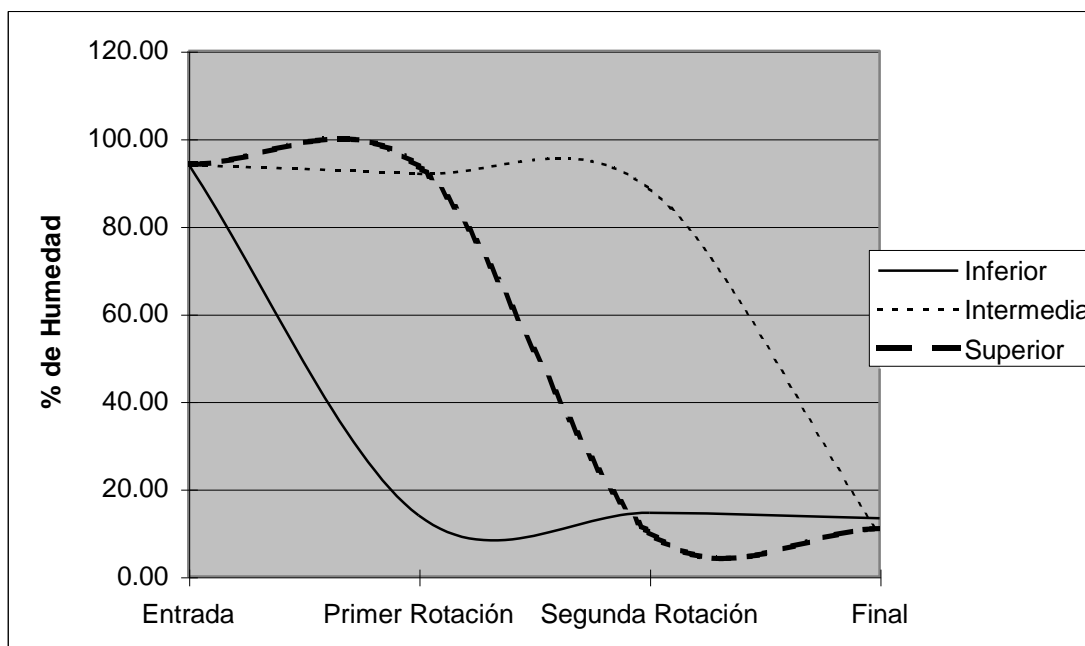
Tabla 21: Resultados de humedad para la prueba número 1

Bandeja	Humedad			
	Entrada	Primera rotación	Segunda rotación	Salida de producto
Inferior	94.20 % \pm 0.005%	13.92 % \pm 0.005%	14.50 % \pm 0.005%	13.26 % \pm 0.005%
Intermedia	93.90 % \pm 0.005%	91.94 % \pm 0.005%	88.63 % \pm 0.005%	9.29 % \pm 0.005%
Superior	94.10 % \pm 0.005%	93.61 % \pm 0.005%	10.09 % \pm 0.005%	10.98 % \pm 0.005%

Observaciones:

El producto final presentó cierto grado de carbonización, lo cual implica que la combinación de tiempo y temperatura no fue adecuada. Existen grandes diferencias de velocidad de secado entre las bandejas inferiores, intermedias y superiores.

Gráfica 4: Curva de secado de prueba número 1.



2. Prueba número 2. Descripción de configuración de diseño. Se mantuvieron las mismas condiciones de diseño que en la prueba número 1, exceptuado los tiempos de rotación de bandejas y el grosor de las rodajas de tomate. El tomate se cortó en rodajas de 3 cm. El tiempo total de secado para esta prueba fue de 12 horas.

Tabla 22: Tiempos de rotación de bandejas de prueba número 2.

Evento	Hora
Entrada de producto	5:00 AM
Primera rotación	9:00 PM
Segunda rotación	1:00 PM
Salida de producto	5:00 PM

Tabla 23: Resultados de peso para la prueba número 2.

	Peso total
Inicial	6135 g \pm 0.5 g
Final	1345 g \pm 0.5 g

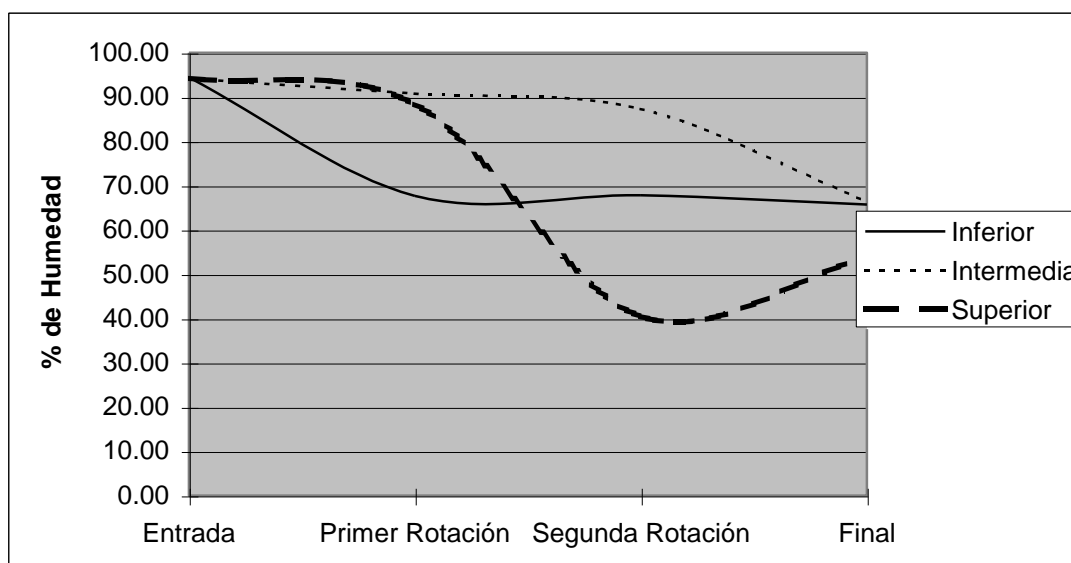
Tabla 24: Resultados de humedad para la prueba número 2.

Bandeja	Humedad			
	Entrada	Primera rotación	Segunda rotación	Salida de producto
Inferior	94.43 % \pm 0.005%	67.70 % \pm 0.005%	67.84 % \pm 0.005%	65.70 % \pm 0.005%
Intermedia	94.17 % \pm 0.005%	90.77 % \pm 0.005%	87.31 % \pm 0.005%	66.35 % \pm 0.005%
Superior	94.21 % \pm 0.005%	88.40 % \pm 0.005%	40.50 % \pm 0.005%	53.80 % \pm 0.005%

Observaciones:

La rotación del producto ayuda a obtener un secado más uniforme, sin embargo el resultado final demostró que el secado del producto no es homogéneo, lo cual implica una mala distribución del calor. El porcentaje de humedad del producto final es muy alto, lo cual implica que no se deshidrató completamente el tomate.

Gráfica 5: Curva de secado de prueba de tomate número 2.



3. Prueba número 3. Descripción de configuración de diseño: se mantuvieron las mismas condiciones de diseño que en la prueba número 2, exceptuando el uso de un ventilador adicional colocado en el interior del deshidratador. El ventilador instalado es de 12 V y 0.70 Amp y se colocó en la parte inferior del deshidratador, dirigiendo el flujo de aire hacia arriba.

Tabla 25: Tiempos de rotación de bandejas de prueba número 3.

Evento	Hora
Entrada de producto	5:00 AM
Primera rotación	9:00 PM
Segunda rotación	1:00 PM
Salida de producto	5:00 PM

Tabla 26: Resultados de peso para la prueba número 3.

	Peso total
Inicial	5905 g \pm 0.5 g
Final	570 g \pm 0.5 g

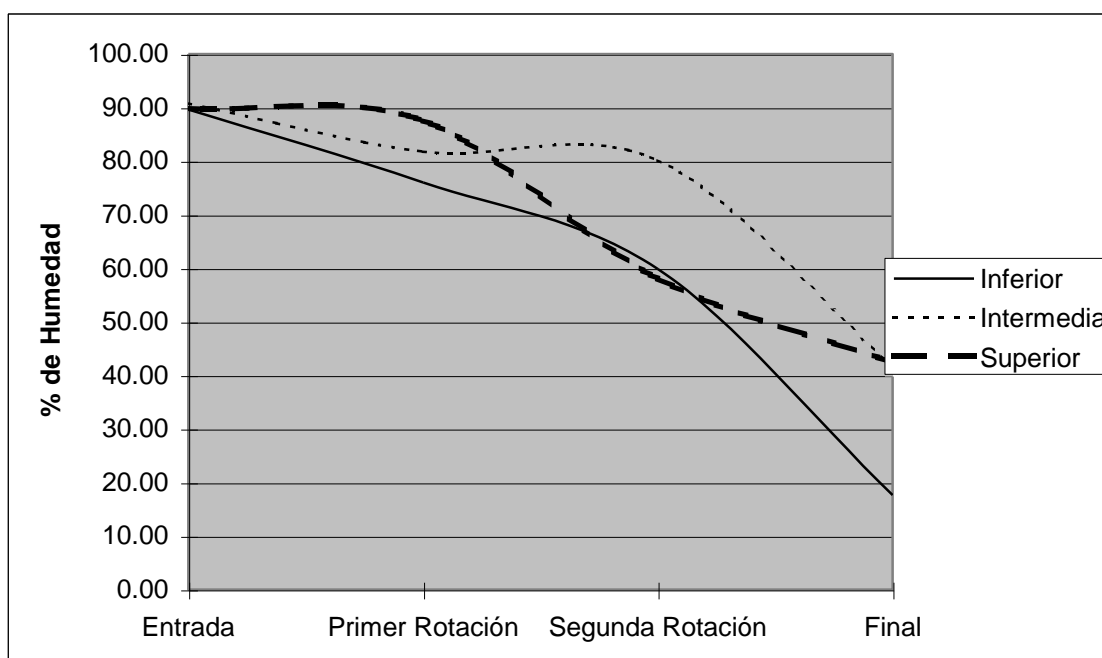
Tabla 27: Resultados de humedad para la prueba número 3.

Bandeja	Humedad			
	Entrada	Primera rotación	Segunda rotación	Salida de producto
Inferior	89.64 % \pm 0.005%	76.03 % \pm 0.005%	59.84 % \pm 0.005%	17.65 % \pm 0.005%
Intermedia	90.76 % \pm 0.005%	81.76 % \pm 0.005%	80.16 % \pm 0.005%	41.77 % \pm 0.005%
Superior	89.81 % \pm 0.005%	87.56 % \pm 0.005%	58.08 % \pm 0.005%	42.42 % \pm 0.005%

Observación:

Se obtuvo un secado más homogéneo que en las pruebas anteriores, ya que la velocidad de secado entre las bandejas inferiores, intermedias y superiores es similar. El ventilador colocado en la parte inferior del deshidratador ayuda a mantener mejor distribuido el calor dentro del deshidratador. La humedad final del tomate es aceptable para el uso que se le desea dar al producto. El producto final de las bandejas inferiores obtuvo un porcentaje de humedad menor al resto de las muestras, sin embargo el secado en general resultó ser más homogéneo que en el resto de las pruebas.

Gráfica 6: Curva de secado de prueba número 3.



4. Pruebas de secado utilizando como fuente de calor el intercambiador. Para las pruebas con el intercambiador como fuente de calor se utiliza el ventilador de (1/60) HP en la parte superior del deshidratador (como extractor) y el ventilador de 12 V y 0.70 Amp en la parte inferior del deshidratador (para dirigir el aire hacia arriba). El intercambiador es la única fuente de calor para estas pruebas.

a. Secado de tomate

Tabla 28: Tiempos de rotación de bandejas para prueba de secado de tomate.

Evento	Hora
Entrada de producto	5:00 AM
Primera rotación	9:00 PM
Segunda rotación	1:00 PM
Salida de producto	5:00 PM

Tabla 29: Resultados de peso para prueba de secado de tomate.

	Peso total
Inicial	5700 g \pm 0.5 g
Final	560 g \pm 0.5 g

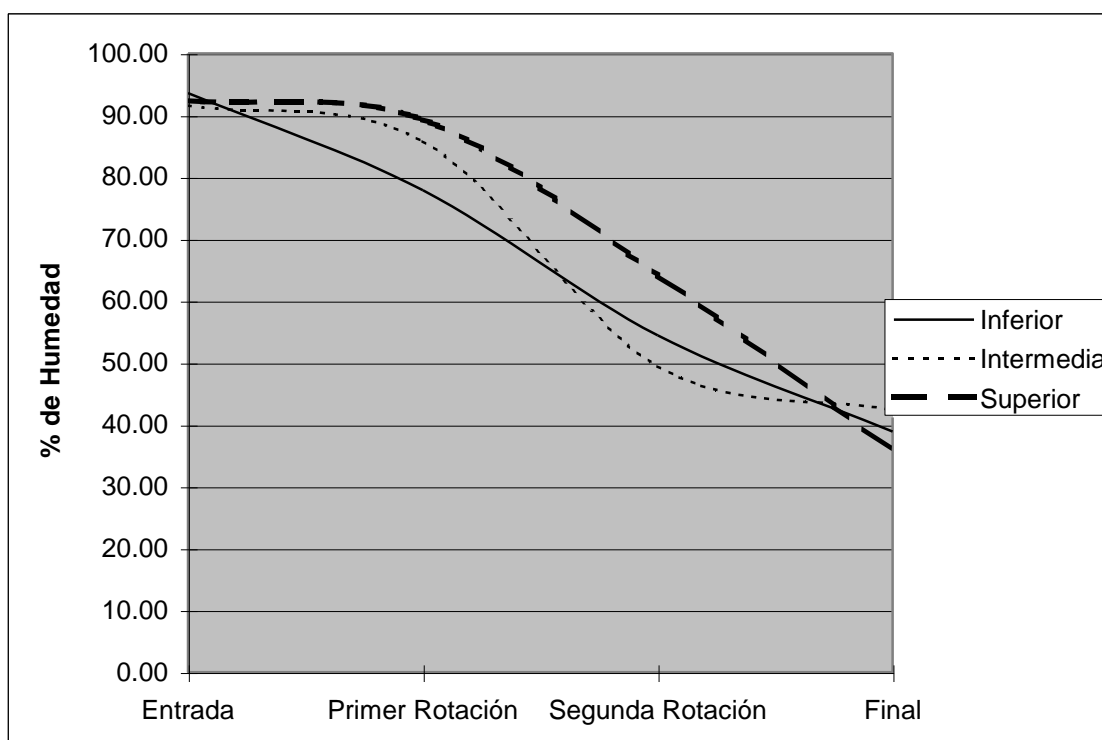
Tabla 30: Resultados de humedad para prueba de secado de tomate.

Bandeja	Humedad			
	Entrada	Primera rotación	Segunda rotación	Salida de producto
Inferior	93.62 % $\pm 0.005\%$	77.89 % $\pm 0.005\%$	54.45 % $\pm 0.005\%$	38.92 % $\pm 0.005\%$
Intermedia	91.57 % $\pm 0.005\%$	85.82 % $\pm 0.005\%$	49.42 % $\pm 0.005\%$	42.34 % $\pm 0.005\%$
Superior	92.34 % $\pm 0.005\%$	89.32 % $\pm 0.005\%$	64.16 % $\pm 0.005\%$	35.89 % $\pm 0.005\%$

Observación:

Las velocidades de secado para todas las bandejas son muy similares. El color del producto final es bueno. No hay carbonización. La humedad del producto final es adecuada y uniforme.

Gráfica 7: Curva de secado de tomate.



b. Secado de cebolla.

Tabla 31: Tiempos de rotación de bandejas para prueba de secado de cebolla.

Evento	Hora
Entrada de producto	5:15 AM
Primera rotación	8:15 PM
Segunda rotación	11:15 PM
Salida de producto	2:15 PM

Tabla 32: Resultados de peso para prueba de secado de cebolla.

	Peso total
Inicial	4850 g \pm 0.5 g
Final	465 g \pm 0.5 g

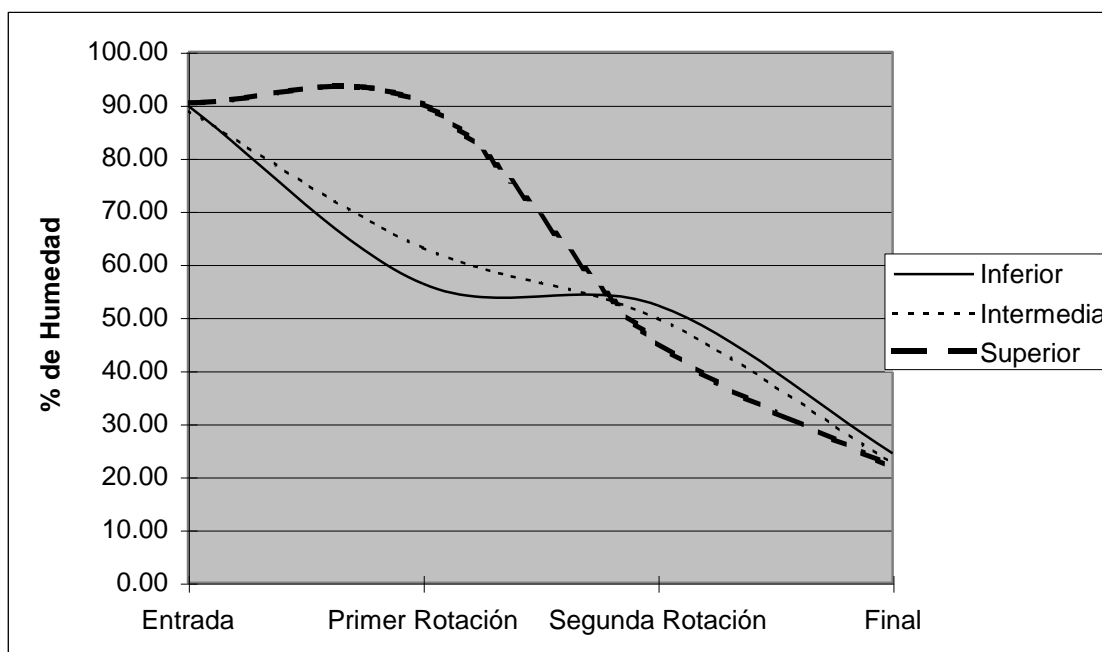
Tabla 33: Resultados de humedad para prueba de secado de cebolla.

Bandeja	Humedad			
	Entrada	Primera rotación	Segunda rotación	Salida de producto
Inferior	89.89 % \pm 0.005%	56.37 % \pm 0.005%	52.27 % \pm 0.005%	24.37 % \pm 0.005%
Intermedia	88.94 % \pm 0.005%	63.09 % \pm 0.005%	49.76 % \pm 0.005%	22.50 % \pm 0.005%
Superior	90.42 % \pm 0.005%	90.20 % \pm 0.005%	45.21 % \pm 0.005%	21.70 % \pm 0.005%

Observación:

Las velocidades de secado para todas las bandejas son muy similares. El color del producto final es bueno. No hay carbonización. La humedad del producto final es adecuada y uniforme.

Gráfica 8: Curva de secado de cebolla.



c. Secado de perejil.

Tabla 34: Tiempos de rotación de bandejas para prueba de secado de perejil.

Evento	Hora
Entrada de producto	5:30 AM
Primera rotación	7:30 PM
Segunda rotación	9:30 PM
Salida de producto	11:30 PM

Tabla 35: Resultados de peso para prueba de secado de perejil.

	Peso total
Inicial	1545 g \pm 0.5 g
Final	145 g \pm 0.5 g

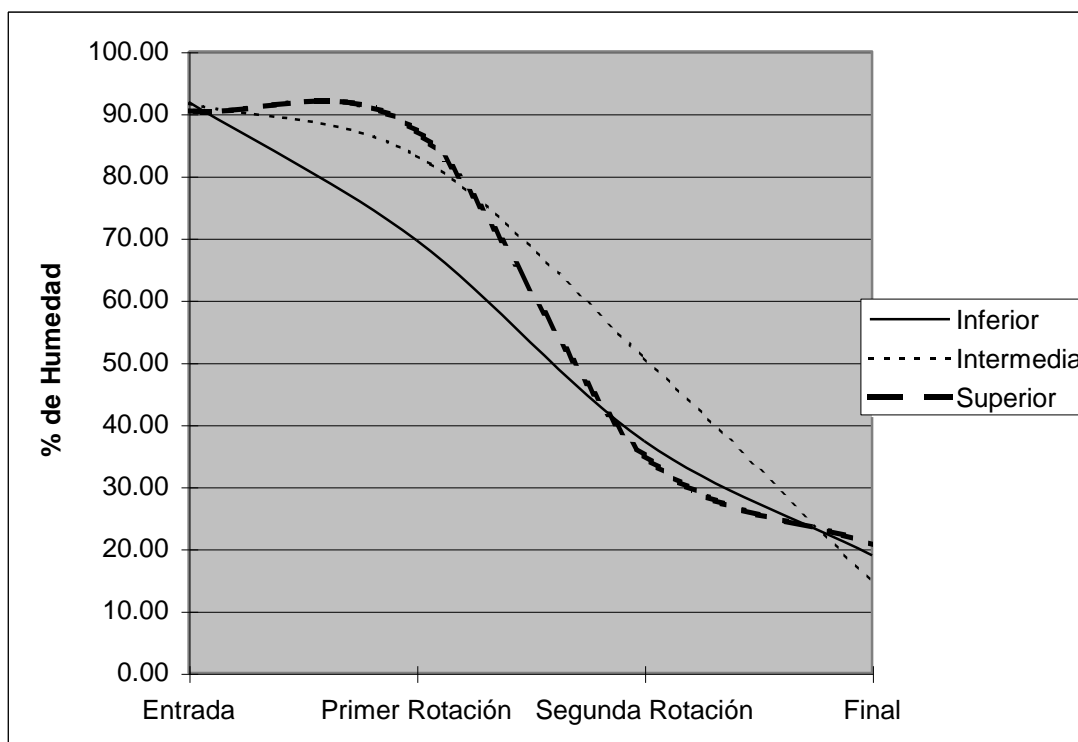
Tabla 36: Resultados de humedad para prueba de secado de perejil.

Bandeja	Humedad			
	Entrada	Primera rotación	Segunda rotación	Salida de producto
Inferior	91.87 % \pm 0.005%	69.63 % \pm 0.005%	37.33 % \pm 0.005%	18.92 % \pm 0.005%
Intermedia	91.63 % \pm 0.005%	83.21 % \pm 0.005%	50.71 % \pm 0.005%	14.74 % \pm 0.005%
Superior	90.43 % \pm 0.005%	87.23 % \pm 0.005%	35.03 % \pm 0.005%	20.64 % \pm 0.005%

Observación:

Las velocidades de secado para todas las bandejas son muy similares. El color del producto final es bueno. No hay carbonización. La humedad del producto final es adecuada y uniforme.

Gráfica 9: Curva de secado de perejil.



5. Pruebas de secado utilizando como fuente de calor la resistencia eléctrica y el intercambiador.

Para las pruebas con resistencia eléctrica y el intercambiador como fuentes de calor se utiliza el ventilador de 12 V y 0.16 Amp en la parte superior del deshidratador (como extractor) y el ventilador de 12 V y 0.70 Amp en la parte inferior del deshidratador (para dirigir el aire hacia arriba). La resistencia eléctrica (baja potencia) se utiliza en combinación con el intercambiador de calor.

a. Secado de tomate

Tabla 37: Tiempos de rotación de bandejas para prueba de secado de tomate.

Evento	Hora
Entrada de producto	5:30 AM
Primera rotación	9:30 PM
Segunda rotación	1:30 PM
Salida de producto	5:30 PM

Tabla 38: Resultados de peso para prueba de secado de tomate.

	Peso total
Inicial	5650 g \pm 0.5 g
Final	550 g \pm 0.5 g

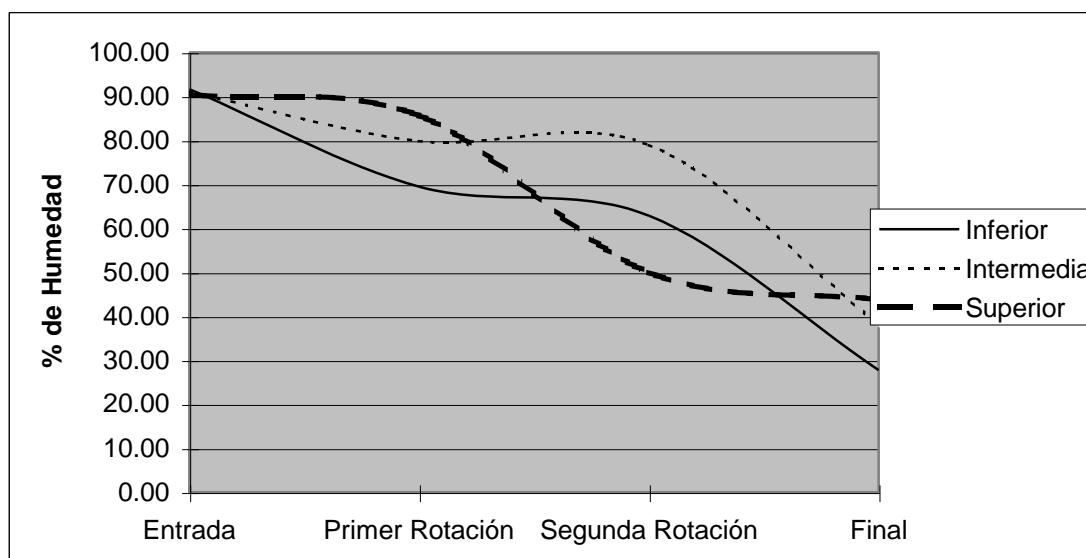
Tabla 39: Resultados de humedad para prueba de secado de tomate.

Bandeja	Humedad			
	Entrada	Primera rotación	Segunda rotación	Salida de producto
Inferior	91.65 % \pm 0.005%	69.45 % \pm 0.005%	62.87 % \pm 0.005%	27.76 % \pm 0.005%
Intermedia	91.06 % \pm 0.005%	79.85 % \pm 0.005%	78.93 % \pm 0.005%	38.23 % \pm 0.005%
Superior	90.36 % \pm 0.005%	85.65 % \pm 0.005%	49.94 % \pm 0.005%	43.78 % \pm 0.005%

Observación:

El secado es homogéneo y satisfactorio. No hay carbonización. La humedad final es adecuada para todo el tomate. El color es bueno. La velocidad de secado entre las bandejas inferiores, intermedias y superiores es similar.

Gráfica 10: Curva de secado de tomate.



b. Secado de cebolla.

Tabla 40: Tiempos de rotación de bandejas para prueba de secado de cebolla.

Evento	Hora
Entrada de producto	5:30 AM
Primera rotación	8:30 PM
Segunda rotación	11:30 PM
Salida de producto	2:30 PM

Tabla 41: Resultados de peso para prueba de secado de cebolla.

	Peso total
Inicial	5235 g \pm 0.5 g
Final	495 g \pm 0.5 g

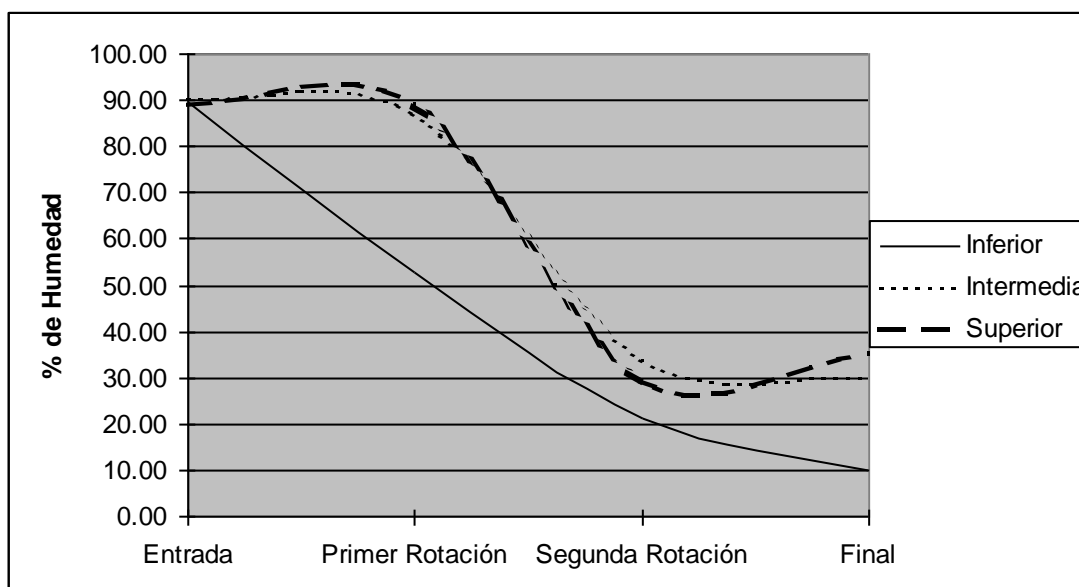
Tabla 42: Resultados de humedad para prueba de secado de cebolla.

Bandeja	Humedad			
	Entrada	Primera rotación	Segunda rotación	Salida de producto
Inferior	89.57 % \pm 0.005%	52.88 % \pm 0.005%	21.11 % \pm 0.005%	10.05 % \pm 0.005%
Intermedia	90.02 % \pm 0.005%	87.02 % \pm 0.005%	33.73 % \pm 0.005%	30.08 % \pm 0.005%
Superior	88.95 % \pm 0.005%	88.89 % \pm 0.005%	28.86 % \pm 0.005%	34.86 % \pm 0.005%

Observación:

No hay carbonización. La humedad final es adecuada. El color es bueno. La velocidad de secado de las bandejas inferiores fue más rápida, lo cual causó que las cebollas de estas bandejas tengan una humedad final menor a las otras cebollas. El rango de humedad obtenido en los productos finales es aceptable para el uso que se le dará al producto final.

Gráfica 11: Curva de secado de cebolla.



c. Secado de perejil

Tabla 43: Tiempos de rotación de bandejas para prueba de secado de perejil.

Evento	Hora
Entrada de producto	5:30 AM
Primera rotación	7:30 PM
Segunda rotación	9:30 PM
Salida de producto	11:30 PM

Tabla 44: Resultados de peso para prueba de secado de perejil.

	Peso total
Inicial	1440 g \pm 0.5 g
Final	130 g \pm 0.5 g

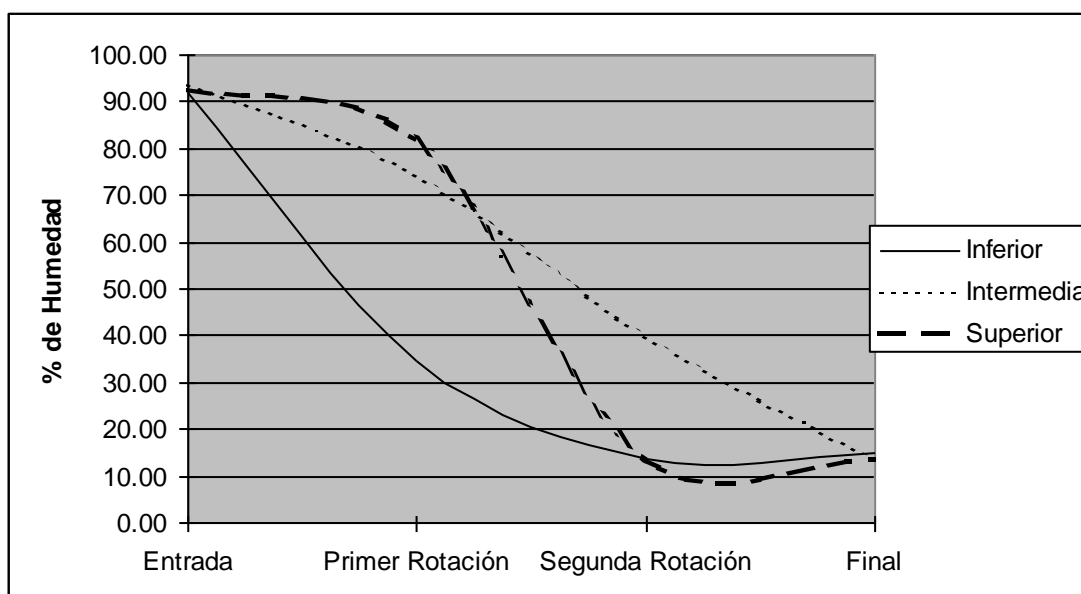
Tabla 45: Resultados de humedad para prueba de secado de perejil.

Bandeja	Humedad			
	Entrada	Primera rotación	Segunda rotación	Salida de producto
Inferior	92.03 % \pm 0.005%	34.62 % \pm 0.005%	13.82 % \pm 0.005%	15.03 % \pm 0.005%
Intermedia	93.45 % \pm 0.005%	74.27 % \pm 0.005%	39.76 % \pm 0.005%	13.39 % \pm 0.005%
Superior	92.12 % \pm 0.005%	81.57 % \pm 0.005%	13.08 % \pm 0.005%	13.30 % \pm 0.005%

Observación:

El color y la humedad de los productos finales son adecuados. Existen leves diferencias en las velocidades de secado entre las bandejas inferiores, las intermedias y superiores, sin embargo la humedad final de todo el perejil es igual.

Gráfica 12: Curva de secado de perejil.



VII. DISCUSIÓN

Para la elaboración de este trabajo de investigación fue necesario dividir el trabajo en dos partes. La primera consiste en el diseño y construcción del equipo de deshidratación. La segunda se refiere todas las pruebas que se llevaron a cabo para determinar el funcionamiento del equipo construido. Antes de discutir los resultados de las pruebas que se llevaron a cabo para verificar el funcionamiento del equipo se discutirán algunos aspectos acerca de la construcción del deshidratador y el intercambiador de calor.

Las chimeneas originales de los hornos de gas descargan los gases de combustión hacia el exterior. La idea del intercambiador consiste en reunir todos estos gases dentro de un solo tubo antes de que sean expulsados a la atmósfera. Las chimeneas de los dos hornos grandes de la panadería tienen 12 pulgadas de diámetro y la del horno pequeño tiene 5 pulgadas de diámetro. El tubo exterior del intercambiador de calor debe ser lo suficientemente grande como para transportar los gases de combustión de tres hornos al mismo tiempo. Es decir que no es posible que sea del mismo diámetro que las chimeneas originales, ya que esto causaría una acumulación excesiva de gases dentro del intercambiador de calor. Esta acumulación excesiva podría causar que los hornos de gas no logren operar de una manera adecuada, siendo esta la razón por la cual se construyó el tubo exterior del intercambiador con un diámetro de 17 pulgadas. El material del tubo exterior del intercambiador se construyó de lámina galvanizada. Este es un material resistente al calor, ya que se utiliza normalmente para la fabricación de chimeneas de hornos de combustión. Es importante considerar el grosor de la lámina galvanizada, ya que esta estructura debe de ser lo suficientemente rígida como para poder colocar el tubo en una posición horizontal sobre las salidas de gas de los hornos. Si la lámina es muy delgada, entonces el peso del intercambiador puede deformar el tubo exterior y hacer que toda la estructura colapse. Si la lámina es muy gruesa, se tiene la desventaja que el intercambiador puede llegar a pesar mucho, lo cual dificulta mantener la estructura bien sujeta sobre los hornos. Además al aumentar el grosor del material, se eleva el precio de este mismo. Para la construcción de este intercambiador de calor se utilizó lámina galvanizada de calibre 24, lo cual resultó ser suficientemente rígido y a la vez liviano para poder llevar a cabo una instalación adecuada.

Debido a la posición de los tres hornos de la panadería en donde se instaló el equipo, solamente fue posible colocar el tubo del intercambiador directamente sobre los dos hornos grandes. Esto se debe a que la altura de la base de la chimenea de los hornos grandes se encuentra aproximadamente 50 centímetros más alto que la base de la salida del horno pequeño. Para poder unir la chimenea del horno pequeño al intercambiador se utilizó un tubo de aluminio flexible de 5 pulgadas de diámetro. De esta manera se lograron conectar los tres hornos al intercambiador.

Los tres hornos operaron sin problemas luego de efectuar la instalación del intercambiador de calor, lo cual es muy importante, ya que la construcción de este mismo no debe de interferir con las operaciones de panificación de la empresa en donde se llevó a cabo la instalación.

La razón por la cual se debe utilizar aire caliente para el proceso de deshidratado en vez de utilizar directamente los gases de combustión de los hornos es que estos últimos pueden alterar las características del alimento que se desea deshidratar. Los gases de combustión de los hornos contienen compuestos azufrados que pueden modificar las características sensoriales del alimento. También

contienen cantidades significativas de monóxido de carbono, un gas que debe de evitarse en las áreas en donde se encuentra el personal de trabajo debido al peligro de asfixia. Es por esta razón que para aprovechar el calor de los gases de combustión se debe de utilizar aire calentado mediante el proceso de transferencia de calor efectuado en el intercambiador. El aire que se introduce en el deshidratador nunca tiene contacto directo con los gases de combustión de los hornos de gas propano.

Dentro del tubo principal del intercambiador se encuentran los tubos que tienen la función de transportar el aire que se desea introducir en el deshidratador. El material que se utiliza para llevar a cabo esta función debe ser resistente al calor, ya que los gases de combustión de los hornos llegan a alcanzar una temperatura de hasta 400 °C. Además, es importante adquirir un material que permita una buena transferencia de calor para poder transferir la mayor cantidad de energía de los gases de combustión hacia el aire que pasa dentro de los tubos. El material que se utilizó es el cobre rígido con un diámetro de 7/8 de pulgada. Ya que el tubo exterior del intercambiador de calor es de 17 pulgadas, es posible introducir una gran cantidad de tubos de cobre dentro del tubo de lámina galvanizada. Para este trabajo de investigación se instalaron solamente 5 tubos de cobre rígido, ya que estos proporcionan suficiente área de transferencia de calor para calentar el aire que se utiliza en el proceso de deshidratación. Sin embargo, se tiene planificado instalar 20 tubos más en el futuro para poder maximizar la cantidad de energía que se pueda extraer del intercambiador. El resto de tubos que se tiene planificado instalar en el intercambiador se utilizarán para un sistema de intercambio de calor para calentamiento de agua. En este caso se desea hacer circular agua por los tubos de cobre para elevar la temperatura de esta misma. Luego se almacena el agua caliente en un tanque aislado para evitar que pierda el calor adquirido en el intercambiador. El tanque de agua representa una forma de almacenaje de energía térmica adquirida del intercambiador de calor construido.

Otro componente importante del equipo construido es el gabinete de deshidratado. En este caso es necesario fabricar una caja que contenga un aislamiento térmico para disminuir la pérdida de calor a través de sus paredes. De esta manera se logra aprovechar más la energía que contiene el aire para evaporar y arrastrar la humedad que contiene el producto. Para este trabajo de investigación se utilizó un gabinete que cuenta con aislamiento de Duroport. El material del interior del deshidratador es de aluminio, el cual ofrece ventajas en cuanto a su fácil limpieza e inocuidad hacia los alimentos. La conexión entre el intercambiador de calor y el deshidratador se llevó a cabo mediante un tubo de aluminio de 5 pulgadas de diámetro.

Las bandejas que se utilizaron en este deshidratador fueron fabricadas a partir de bandejas de aluminio perforadas que se utilizaban anteriormente para hornear pan. Las bandejas utilizadas tienen 10 perforaciones por cada centímetro cuadrado, lo cual permite suficiente paso de aire, sin embargo evita que productos de granulometría fina como el perejil deshidratado pasen a través de las perforaciones y caigan al fondo del deshidratador. Se colocaron angulares de aluminio en las paredes del deshidratador para sostener las bandejas.

Para movilizar el aire a través del intercambiador hasta el deshidratador se presentaron en el momento de la construcción del equipo dos opciones. La primera consiste en colocar los ventiladores en la entrada de aire del intercambiador. En este caso el ventilador debe empujar el aire para que se transporte dentro de los tubos hacia el deshidratador. Luego entra en la parte inferior del deshidratador y

pasa a través de las bandejas perforadas hasta salir en la parte superior. La segunda opción consiste en colocar los ventiladores en la salida superior del deshidratador. En este caso el ventilador crea un vacío parcial dentro del gabinete. Este vacío parcial provoca que entre aire por el tubo de conexión que se encuentra conectado al intercambiador. De esta manera se obtiene el aire que ha pasado por los tubos de cobre. Las pruebas iniciales demostraron que la segunda opción resultaba mucho más eficiente en cuanto a la cantidad de aire que fue posible movilizar. Esto se debe a que el ventilador que se utilizó está diseñado para ser utilizado como extractor de aire.

En un proceso de deshidratado, el aire que se introduce al gabinete contiene menor porcentaje de humedad que el aire que sale del deshidratador, ya que este último contiene la humedad que se retiró de los alimentos. Mientras más seco sea el aire que se introduce al deshidratador, mayor capacidad se tiene de arrastrar la humedad que contienen los alimentos. Con base a esto se presentó la idea de colocar un material como silica gel en la entrada del intercambiador para disminuir el porcentaje de humedad del aire y así hacer que el proceso de deshidratado sea más eficiente. Se contactó a un proveedor local de este material para averiguar sobre la capacidad de este mismo para extraer la humedad del aire que se desea movilizar dentro del intercambiador de calor. La información proporcionada por el proveedor del material indica que no es posible extraer la humedad utilizando silica gel al aire que se encuentra en constante movimiento, ya que la silica gel absorbe la humedad lentamente y sólo es eficiente cuando se encuentra en contacto con el aire por largos períodos de tiempo (por ejemplo en una campana de absorción de humedad). El aire del intercambiador que pasaría por la silica gel tendría muy poco tiempo de contacto como para que se logre extraer humedad. En base a esta información no se llevaron a cabo pruebas para determinar si el uso de silica gel ayuda a aumentar la eficiencia del equipo construido.

Como se ha mencionado anteriormente, la segunda fase del trabajo de investigación se refiere a todas las pruebas que se llevaron a cabo para determinar el funcionamiento del equipo construido.

La primera serie de pruebas que se llevaron a cabo con el deshidratador sirven para determinar las condiciones de operación del equipo al utilizar diferentes combinaciones de construcción y diseño. Esto es muy importante, ya que uno de los principales objetivos de este trabajo de investigación implica construir un equipo de deshidratación que sea funcional y que cumpla con la característica de aprovechar lo más posible el calor proveniente de las chimeneas de otros hornos. Se desea que la construcción del equipo permita un aprovechamiento eficiente del calor del intercambiador. Las primeras pruebas se llevaron a cabo tomando lecturas de temperatura dentro del deshidratador. Los resultados evidencian que efectivamente existe un aprovechamiento de calor, ya que hay un aumento en la temperatura interna del deshidratador en las pruebas en que la única fuente de calor es el aire que proviene del intercambiador. Los resultados para todas las configuraciones analizadas indican que existe un gradiente en la temperatura de las bandejas dentro del deshidratador. Las bandejas colocadas en el inferior del deshidratador alcanzan temperaturas más altas, mientras que las bandejas ubicadas en la parte superior llegan a tener temperaturas más bajas. Esto es característico de un deshidratador de flujo vertical. La variación de temperatura entre las bandejas del deshidratador es un indicador de que la rotación de estas mismas es un paso importante para llevar a cabo un secado más homogéneo, sin embargo esto se hará más evidente al analizar posteriormente las curvas de secado para los productos que se desean deshidratar.

Las diferentes combinaciones de diseño que se estudiaron para este equipo se refieren a cambios en el origen de la fuente de calor, así como variaciones en las velocidades de movilización del aire dentro del deshidratador. Las posibles fuentes de calor para el deshidratador son el intercambiador, la resistencia eléctrica y la combinación de ambas. El calor que se obtiene del intercambiador proviene de los gases de combustión de los hornos de gas propano de la panadería. La panadería en donde se instaló el equipo de deshidratación cuenta con tres hornos de gas propano. En un día de trabajo normal los hornos de esta panadería permanecen encendidos durante un promedio de 6 horas y 30 minutos, sin embargo no siempre se encienden los tres hornos al mismo tiempo. La información proporcionada por los encargados de la panadería indica que en un 60% del tiempo se tienen encendidos los tres hornos al mismo tiempo. El resto del tiempo permanece encendido solamente un horno.

Para las pruebas con el intercambiador como fuente de calor se tomaron lecturas de las temperaturas del deshidratador cuando los tres hornos se encontraban encendidos y también cuando se encontraba encendido solamente un horno. Los resultados indican que es favorable cuando se tienen encendidos los tres hornos al mismo tiempo, ya que la temperatura dentro del deshidratador fue mayor que cuando se tiene solamente un horno encendido. Los tres hornos generan mayor cantidad de gases de combustión dentro del tubo exterior del intercambiador, lo cual tiene como resultado una mayor tasa de transferencia de calor en el intercambiador. Al tener los tres hornos de gas encendidos, la temperatura dentro del deshidratador se encuentra dentro de un rango de 50 a 60 °C al utilizar el ventilador de alta capacidad y 45 a 55 °C al utilizar el ventilador de baja capacidad.

Las pruebas se llevaron a cabo utilizando dos tipos de ventiladores de aire. El primero es un extractor de (1/60) HP y el segundo es un ventilador de mucho menor capacidad (12 V y 0.16 Amp). Ambos ventiladores se colocaron en la parte superior del deshidratador con el fin de extraer el aire que se encuentra dentro de este mismo. Con estas pruebas se determina cuál es el flujo de aire que mejor se adapta al aprovechamiento del calor. Cuando se tiene al intercambiador como fuente única de calor, la temperatura del interior del deshidratador aumenta, lo cual indica que sí se está logrando extraer calor del intercambiador. Los resultados indican que cuando se utilizó el extractor de (1/60) HP se tiene un aumento entre 5 y 10 °C en las lecturas de temperatura respecto a la temperatura alcanzada con el ventilador de baja capacidad. Es decir que se logra extraer mayor cantidad de energía del intercambiador utilizando el extractor de alta capacidad, ya que es posible movilizar mayor cantidad de aire caliente. El ventilador de menor capacidad también logra movilizar suficiente aire como para aumentar la temperatura del interior del deshidratador, sin embargo al tratarse de menos cantidad de aire, se llega a tener menor temperatura dentro del deshidratador. En el caso que se utilice el intercambiador como única fuente de calor, se obtienen mejores resultados al utilizar el ventilador de alta capacidad.

También se llevaron a cabo pruebas utilizando como fuente de calor la resistencia eléctrica colocada dentro del deshidratador. Esta resistencia se instaló en el equipo junto con un regulador de potencia que permite ajustar el consumo eléctrico. Al utilizar el ventilador de baja capacidad se ajustó el regulador de potencia de la resistencia a un nivel intermedio. A este nivel se tiene un consumo aproximado de 333 Watts. Al utilizar el extractor de alta capacidad fue necesario aumentar el nivel de potencia de la resistencia a un nivel intermedio-alto, lo cual implica una desventaja, ya que se tiene un

consumo de aproximadamente 400 Watts. Con el ventilador de alta potencia se debe de ajustar la resistencia a un nivel más alto, ya que el flujo de aire es mayor y requiere que se genere más calor en la resistencia para poder elevar la temperatura del deshidratador. En cuanto al consumo eléctrico se tiene una mayor ventaja al utilizar el ventilador de baja capacidad, ya que permite ajustar la resistencia a un nivel de potencia que consume menos energía eléctrica. El uso del ventilador de baja capacidad también tiene ventajas en cuanto a la temperatura que se alcanza dentro del deshidratador. Las pruebas de temperatura indican que con el ventilador de baja capacidad se llegan a alcanzar temperaturas entre los 60 y 80 °C, lo cual es apropiado para llevar a cabo el proceso de deshidratación. Al utilizar el ventilador de alta capacidad se obtiene un rango de temperaturas que oscila entre los 60 y 65 °C. Esto indica que es mejor utilizar el ventilador de baja potencia al utilizar la resistencia eléctrica como fuente de poder. Sin embargo, por razones de eficiencia energética no se recomienda el uso de la resistencia, ya que eleva los costos de operación del equipo.

Se llevaron a cabo pruebas utilizando simultáneamente el calor proveniente del intercambiador y de la resistencia eléctrica para determinar si existe alguna ventaja del uso combinado de ambas fuentes de calor. Los resultados indican que en este caso las temperaturas alcanzadas dentro del deshidratador fueron mayores que cuando se utilizó ya sea el intercambiador o la resistencia eléctrica como fuente única de calor. Es decir que el uso simultáneo de las fuentes de calor genera temperaturas mayores, las cuales se encuentran en el rango de los 80 a 100 °C. Al usar dos fuentes de calor simultáneamente, se tiene mayor cantidad de energía aportada, ya que el aire que ingresa al deshidratador se encuentra a una temperatura elevada y posteriormente es calentado aún más por la resistencia eléctrica.

Hasta ahora los resultados han demostrado que los dos tipos de ventiladores tienen diferentes ventajas, dependiendo de la fuente de calor que se utilice. Para las pruebas en las cuales se utilizó simultáneamente el calor proveniente del intercambiador y de la resistencia eléctrica también se realizaron lecturas de temperatura usando el ventilador de alta capacidad y de baja capacidad. En este caso es evidente que se alcanzaron temperaturas más altas al utilizar el ventilador de baja capacidad.

Para determinar cuál es el diseño que proporciona mejores condiciones de funcionamiento para el deshidratador se deben de considerar tres aspectos, el ahorro energético, las temperaturas alcanzadas y la cantidad de aire que se logra movilizar a través del deshidratador.

El ventilador de alta capacidad ofrece la ventaja de movilizar mayor cantidad de aire a través del deshidratador, sin embargo consume más electricidad. El ventilador de alta capacidad consume 100 Watts, mientras que el de baja capacidad solamente 2 Watts.

Se determinó que dos configuraciones de diseño aportaron buenos resultados en cuanto a los criterios de temperatura alcanzada, ahorro energético y movilización de aire. El consumo eléctrico determinado para cada configuración se refiere a la suma del consumo del ventilador y la resistencia eléctrica (en los casos en que no se utiliza la resistencia eléctrica el consumo eléctrico se refiere solamente al consumo del ventilador).

La primera configuración de diseño con buenos resultados es aquella en la cual se utilizó el ventilador de alta capacidad con el intercambiador de calor como única fuente de calor. En este caso se tiene un consumo eléctrico total de 100 Watts (0 Watts de resistencia eléctrica y 100 Watts del ventilador). Con esta configuración se alcanzaron temperaturas en un rango de 50 a 60°C en el momento

en que los tres hornos de gas se encuentran encendidos. Esta temperatura, en combinación con el alto flujo de aire proporciona buenas condiciones de secado. Se realizaron cálculos teóricos del proceso de secado de tomates para asegurarse que esta configuración de diseño es adecuada para llevar a cabo la deshidratación. Para realizar los cálculos, se tomaron lecturas de las temperaturas de entrada y salida de los productos, así como las temperaturas de entrada y salida del aire. Para determinar la cantidad de agua contenida en el aire se midió la humedad relativa y la temperatura de bulbo seco y luego se utilizó la carta psicrométrica para correlacionar el valor de humedad absoluta. Los cálculos se llevaron a cabo tomando en cuenta que se desea deshidratar 7.2 kilogramos de tomate fresco, lo cual representa la capacidad máxima de almacenaje del gabinete de deshidratación. Se consideró un tiempo total de secado de 12 horas. La humedad inicial y final de los tomates que se tomó en cuenta para los cálculos es de 92% y 40% respectivamente. Los balances de masa y de energía para el proceso de deshidratación permitieron determinar la temperatura teórica de entrada del aire para que el proceso de secado se pueda llevar de acuerdo a las condiciones mencionadas anteriormente. Los resultados indican que al utilizar el ventilador de alta capacidad se necesita que la temperatura de entrada del aire sea de 67.42°C. Es decir, que esta temperatura proporciona las condiciones necesarias para poder deshidratar 7.2 kg de tomate hasta una humedad de 40% en un período de 12 horas. Las pruebas llevadas a cabo con el deshidratador revelan que la temperatura del aire de entrada es de 65°C. Esto implica que el intercambiador de calor proporciona aire a una temperatura muy cercana a lo que los cálculos teóricos indican que es necesario para poder llevar a cabo la deshidratación. Es decir que el uso del intercambiador como fuente de calor utilizando el ventilador de alta capacidad es factible para el funcionamiento del equipo. También se llevaron a cabo cálculos teóricos con la configuración en la cual se usa el ventilador de baja capacidad. En este caso el caudal del aire es mucho menor al caudal de aire que proporciona el ventilador de alta capacidad. La temperatura teórica para la entrada de aire al utilizar el ventilador de baja capacidad es de 114.37°C. Esto es un indicador que si se utiliza el ventilador de baja capacidad, no es factible el uso del calor proveniente del intercambiador, ya que las pruebas con el equipo revelan que con esta configuración solamente es posible alcanzar temperaturas de entrada de aire de aproximadamente 56°C. Si se desea utilizar el ventilador de baja capacidad, es necesario agregar otra fuente de calor aparte del intercambiador. Esto se lograría al utilizar la combinación de fuente de calor proveniente del intercambiador y la resistencia eléctrica.

La segunda configuración de diseño que aportó buenos resultados es aquella en la cual se utilizó el ventilador de baja capacidad y la combinación de fuente de calor proveniente del intercambiador y la resistencia eléctrica. El consumo eléctrico total es de 162 Watts (160 Watts de la resistencia eléctrica y 2 Watts del ventilador). En este caso se alcanzaron temperaturas en el rango de 75 a 100 °C dentro del deshidratador en el momento en que los tres hornos de gas se encuentran encendidos. Esta configuración de diseño proporciona temperaturas más altas, sin embargo el flujo de aire es menor, ya que se utiliza el ventilador de baja capacidad.

Es evidente que otras configuraciones de diseño presentaron consumos eléctricos mucho más bajos, por ejemplo al utilizar el ventilador de baja capacidad y el intercambiador como fuente única de calor en donde el consumo total es de sólo 2 Watts, sin embargo los resultados en cuanto a las temperaturas alcanzadas para esta configuración no son satisfactorios y por lo tanto no apoyan al uso de esa

configuración. Las pruebas de secado de tomate, cebolla y perejil se llevaron a cabo con las dos configuraciones de diseño mencionadas que aportaron los mejores resultados.

Primero se llevaron a cabo pruebas con tomate con la configuración en la cual se tiene el ventilador de alta capacidad y el intercambiador como única fuente de calor. Con las primeras dos pruebas realizadas se determina si se tiene una buena distribución del calor dentro del deshidratador y se estima el tiempo de secado necesario para el tomate. Las rotaciones de las bandejas para la prueba número 1 de secado de tomate se llevaron a cabo cada 8 horas. El tiempo total de secado fue de 24 horas. Los resultados indican que este tiempo es demasiado prolongado para el secado del tomate, ya que el producto final presentó carbonización debido a la exposición prolongada a altas temperaturas. El resto de las pruebas para el tomate se llevaron a cabo con un tiempo de rotación de 4 horas, obteniendo mejores resultados. Las pruebas número 1 y número 2 de secado de tomate indicaron que la velocidad de secado entre las bandejas inferiores, intermedias y superiores es muy distinta. Esto es evidente, ya que las curvas de secado indican que los tomates que se encuentran en las bandejas localizadas cerca de la entrada de aire, obtienen pérdidas de humedad con mayor velocidad. Esto indica que la distribución de calor dentro del deshidratador no es uniforme. La rotación de las bandejas se llevó a cabo con el fin de obtener un secado más uniforme. Es evidente que en la primera rotación al colocar la bandeja superior en la parte inferior del deshidratador, la pérdida de humedad es mucho mayor. Las bandejas intermedias, por ejemplo, se colocan en la parte inferior del deshidratador hasta la segunda rotación. La curva de secado para la prueba número 1 y número 2 demuestra como el tomate de las bandejas intermedias empieza a perder humedad desde el momento en que se coloca en la parte inferior del deshidratador.

Las pruebas número 1 y número 2 de secado de tomate proporcionaron información que indica que el problema más grande del deshidratador es la mala distribución de temperatura. Para resolver esto, se instaló un ventilador adicional en el interior del gabinete. Este ventilador es de 12 V y 0.70 Amp, lo cual implica que tiene un consumo eléctrico de 8.4 Watts. Con la ayuda del ventilador, el aire caliente que entra en la parte inferior del deshidratador es forzado hacia arriba a través de las perforaciones de las bandejas. De esta manera el aire se distribuye mejor dentro del deshidratador. El resto de las pruebas se llevaron a cabo utilizando el ventilador instalado en el inferior del deshidratador.

Los resultados de la prueba número 3 de secado de tomate indican que se obtuvo un secado más homogéneo que en las pruebas anteriores, ya que la velocidad de secado entre las bandejas inferiores, intermedias y superiores es similar. Con esta prueba se comprobó que el ventilador colocado en la parte inferior del deshidratador ayuda a mantener mejor distribuido el calor dentro del deshidratador. La humedad final del tomate es aceptable para el uso que se le desea dar al producto, lo cual indica que el proceso de secado se llevó a cabo satisfactoriamente. El producto final de las bandejas inferiores obtuvo un porcentaje de humedad menor al resto de las muestras, sin embargo el secado en general resultó ser más homogéneo que en el resto de las pruebas.

Como se ha mencionado anteriormente, se determinaron dos configuraciones de diseño que aportaron buenos resultados en las pruebas iniciales. A continuación se discutirán las seis pruebas que se llevaron a cabo con los alimentos para corroborar que estas configuraciones son realmente adecuadas para el funcionamiento del equipo construido. Cada alimento se sometió a un proceso de secado

utilizando las dos configuraciones estudiadas, lo cual implica que el tomate, el perejil y la cebolla se analizaron una vez con el intercambiador como única fuente de calor y una vez con la combinación del intercambiador y la resistencia eléctrica como fuentes de calor.

La primera configuración que se utilizó para deshidratar los productos utiliza el intercambiador como única fuente de calor. El consumo total para este diseño es de solamente 108.4 watts, los cuales son consumidos por el extractor de alta capacidad y el ventilador de recirculación de aire. En la panadería en donde se encuentra instalado el equipo se mantienen encendidos los hornos un promedio de 6 horas y 30 minutos. Para poder deshidratar completamente los productos se necesitan aproximadamente 12, 9 y 6 horas para el tomate, la cebolla y el perejil respectivamente. Los días en los cuales se llevaron a cabo las pruebas se mantuvieron encendidos los hornos durante el tiempo necesario para poder llevar a cabo el proceso completo de deshidratado. De esta manera los resultados obtenidos representan un proceso en el cual los productos fueron deshidratados utilizando solamente el calor proveniente del intercambiador. Los resultados para las pruebas con los alimentos demuestran que las velocidades de secado para todas las bandejas son muy similares, ya que las curvas de secado presentan caídas de humedad constantes y uniformes para las bandejas inferiores, intermedias y superiores. Para esta configuración de diseño se tienen temperaturas más bajas, sin embargo se cuenta con un alto flujo de aire, lo cual permite arrastrar mayor cantidad de humedad del producto. Los resultados para estas pruebas demuestran claramente que sí es factible utilizar el calor proveniente del intercambiador como fuente única de calor, ya que fue posible obtener productos con humedades finales adecuadas y uniformes. Además, el color del producto final es bueno y presenta menos oscurecimiento, ya que las temperaturas para esta configuración de diseño son menores a aquellas en las cuales se utiliza la resistencia eléctrica. Con un consumo de solamente 108.4 watts, se tiene la capacidad de deshidratar un máximo de 16 libras de tomate fresco, lo cual es un buen indicador de que el equipo es altamente eficiente. Si se considera que el KWh tiene un costo de 2 quetzales, se tiene un costo de operación de 22 centavos por cada hora de operación. Es importante mencionar que en este caso para poder aprovechar el calor del intercambiador al máximo, es importante iniciar el proceso de deshidratado a los 5:00 AM, ya que esta es la hora en la cual comienzan a funcionar los hornos de la panadería en donde se encuentra instalado el sistema. El equipo instalado se utilizará en la empresa en donde se llevaron a cabo las pruebas para deshidratar los productos estudiados. La configuración de diseño que utiliza el calor proveniente del intercambiador se podrá usar todos los días por un tiempo de 6 horas y 30 minutos. Para los productos como el tomate y la cebolla será necesario llevar a cabo el proceso de deshidratado en un período de 2 días. El equipo de deshidratación solamente debe de estar encendido durante el tiempo que se encuentran encendidos los hornos de gas. En 2 días, el tiempo de operación combinado de los hornos de la panadería es de 13 horas, lo cual es suficiente para llevar a cabo el secado completamente. Si se opta por deshidratar el tomate y la cebolla en 2 días, no es necesario utilizar la resistencia eléctrica como fuente auxiliar de calor. Para evitar que se tenga que llevar a cabo el proceso de deshidratación en 2 días, se debe de considerar que el equipo tiene que estar instalado sobre hornos que permanecen encendidos por períodos de tiempo que sean iguales o mayores al tiempo total necesario para llevar a cabo el deshidratado.

También se llevaron a cabo pruebas para evaluar el comportamiento de secado de los tres alimentos utilizando como fuente de calor el uso simultáneo del intercambiador y la resistencia eléctrica. Para el tomate el secado es homogéneo y satisfactorio. No hay carbonización, lo cual indica que la combinación de la temperatura y tiempo es adecuada. El color es bueno, ya que no se observó oscurecimiento excesivo. Para el proceso de secado de la cebolla se llevaron a cabo rotaciones de bandeja cada 3 horas, ya que en comparación al tomate, es más fácil de deshidratar. En este caso tampoco se observó carbonización y la humedad final es adecuada. El color es bueno, aunque en algunas cebollas se presentó un leve color dorado causado por las altas temperaturas. La velocidad de secado de las bandejas inferiores fue más rápida, lo cual causó que las cebollas de estas bandejas tengan una humedad final menor a las otras cebollas, sin embargo el rango de humedad obtenido en los productos finales es aceptable para el uso que se le dará al producto final. Para el perejil se utilizaron tiempos de rotación aún mas cortos, ya que es un alimento que cuenta con mucha área superficial. Para este producto también se obtuvieron buenos resultados, ya que el secado transcurrió de una manera homogénea. Utilizando los datos de la curva de secado es evidente que las velocidades de secado entre las bandejas inferiores, intermedias y superiores son similares. El perejil fue el alimento al cual se le pudo extraer la mayor cantidad de humedad, ya que al final se obtuvieron valores entre 13 y 15% de humedad. Para todas estas pruebas se tiene un consumo eléctrico de 170.4 watts, lo cual es muy bueno para un equipo de deshidratación, considerando que 170.4 watts no es una cantidad de energía muy alta para los beneficios que se obtienen del equipo.

Las dos configuraciones para las cuales se llevaron a cabo pruebas con tomate, cebolla y perejil demostraron que proporcionan condiciones adecuadas para llevar a cabo el proceso de secado, sin embargo la configuración que brinda mayor eficiencia es aquella que utiliza solamente la energía proveniente del intercambiador de calor. La razón por la cual esta configuración es más eficiente radica en que no es necesario utilizar la resistencia eléctrica, ya que todo el calor que se utiliza en el proceso se obtiene del intercambiador de calor. El provecho que se obtendrá de la instalación del equipo se refleja en el uso del calor para llevar a cabo el proceso de deshidratado, así como el uso del calor para calentar el agua que se utiliza en los procesos de limpieza.

VIII. CONCLUSIONES

1. Se construyó un intercambiador de calor sobre las chimeneas de los hornos de gas propano, el cual transfiere parte del calor de los gases de combustión hacia el aire que se introduce en el deshidratador.
2. La configuración de diseño que proporcionó mejores resultados en cuanto al ahorro energético, temperatura alcanzada y movilización de aire es aquella que utiliza el ventilador de alta capacidad y el intercambiador como única fuente de calor.
3. Los resultados de las pruebas de deshidratado indican que es factible utilizar el calor proveniente del intercambiador como única fuente de calor para llevar a cabo el proceso de deshidratación de tomate, cebolla y perejil.
4. Las propiedades físicas de los productos sometidos al proceso de deshidratación con el intercambiador como única fuente de calor presentaron una humedad final que es adecuada para el uso que se le desea dar a los productos, lo cual indica que el equipo cumple con las expectativas de funcionamiento.

IX. RECOMENDACIONES

1. Para utilizar el calor del intercambiador durante todo el proceso de deshidratado se debe tomar en cuenta que el equipo debe estar instalado sobre hornos que permanecen encendidos por períodos de tiempo que sean iguales o mayores al tiempo total necesario para llevar a cabo el deshidratado.
2. Se recomienda recubrir con espuma aislante el tubo de conexión entre el intercambiador de calor y el deshidratador de bandejas para evitar pérdidas de calor.
3. Se recomienda instalar 20 tubos de cobre rígido adicionales en el intercambiador de calor para poder maximizar la cantidad de energía que se pueda extraer de este mismo.
4. La energía que no se aprovecha para el proceso de deshidratado se puede almacenar en forma de agua caliente.

X. BIBLIOGRAFÍA:

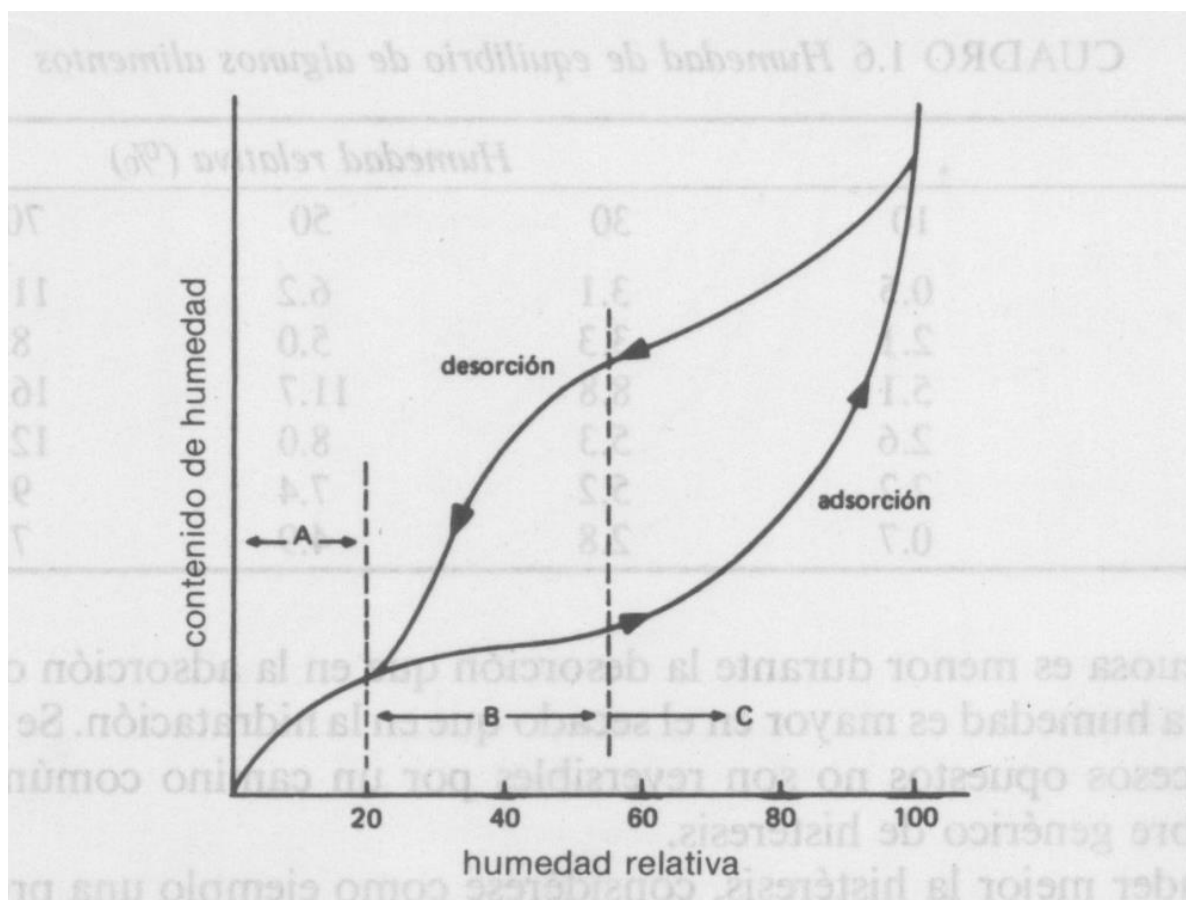
- 1) Badui Dergal, S. 1999. *Química de los Alimentos*. 3 Edición. México. Addison Wesley Longman de México, S.A. de C.V. 648 págs.
- 2) Barbosa-Cánovas, G. 1996. *Dehydration of Foods* 1 Edición. USA. Chapman & Hall. 330 págs.
- 3) Barbosa-Cánovas, G. 1997. *Manual de Laboratorio de Ingeniería de Alimentos*. 1 Edición. España. Editorial Acribia S.A. 153 págs.
- 4) Brennan, J.G., Butters, J.R., Cowell, N. D., Lilley, A. E. V. 1998. *Las operaciones de la ingeniería de los alimentos*. 3 Edición. España. Acribia S.A. 714 págs.
- 5) Charm, S.E. 1978. *The Fundamentals of Food Engineering*. 3 Edición. USA. AVI, Westport, Conn.
- 6) Christopher, G.J. 1997. *Industrial Drying of Foods*. 1 Edición. Reino Unido. Chapman & Hall. 309 págs.
- 7) Crack, J. 1958. *The Fundamental Aspects of the Dehydratation of Food*. 1 Edición. Reino Unido. SCI.
- 8) Earle, R.L. 1998. *Ingeniería de los Alimentos*. 2 Edición. España. Acribia S.A. 203 págs.
- 9) Fox, Brian. 2002. *Ciencia de los alimentos, nutrición y salud*. 1 Edición. México. Editorial Limusa, S.A de C.V. Grupo Noriega Editores. 457 págs.
- 10) Heldman, D. 1981. *Food Process Engineering*. 2 Edición. USA. The Avi Publishing Company, Inc. 416 págs.
- 11) Karel, M. 1974. *Fundamentals of dehydration processes*. 1 Edición. Reino Unido. Applied Science Publishers.
- 12) Kreith, Frank. 2001. *Principios de Transferencia de Calor*. 6 Edición. México. Thomson Editores, S.A de C.V. 700 págs.
- 13) Miller, D.D. 1995. *Química de Alimentos Manual de Laboratorio*. 1 Edición. México. Editorial Limusa S.A. de C.V. Grupo Noriega Editores. 173 págs.
- 14) Rockland, L.B. y Steward, G. F. 1981. *Water Activity: Influences on Food Quality*. 1 Edición. USA. Academic Press.
- 15) Troller, J.A. y Christian, J.H.B. 1978. *Water Activity and Food*. 1 Edición. USA. Academic Press.
- 16) Van Arsdel, W.B., Copley, M.J. y Morgan, A. I. 1973. *Food Dehydration. Vol. 1: Drying Methods and Phenomena*. 2 Edición. USA. AVI, Westport, Conn.

CITAS BIBLIOGRÁFICAS DE INTERNET

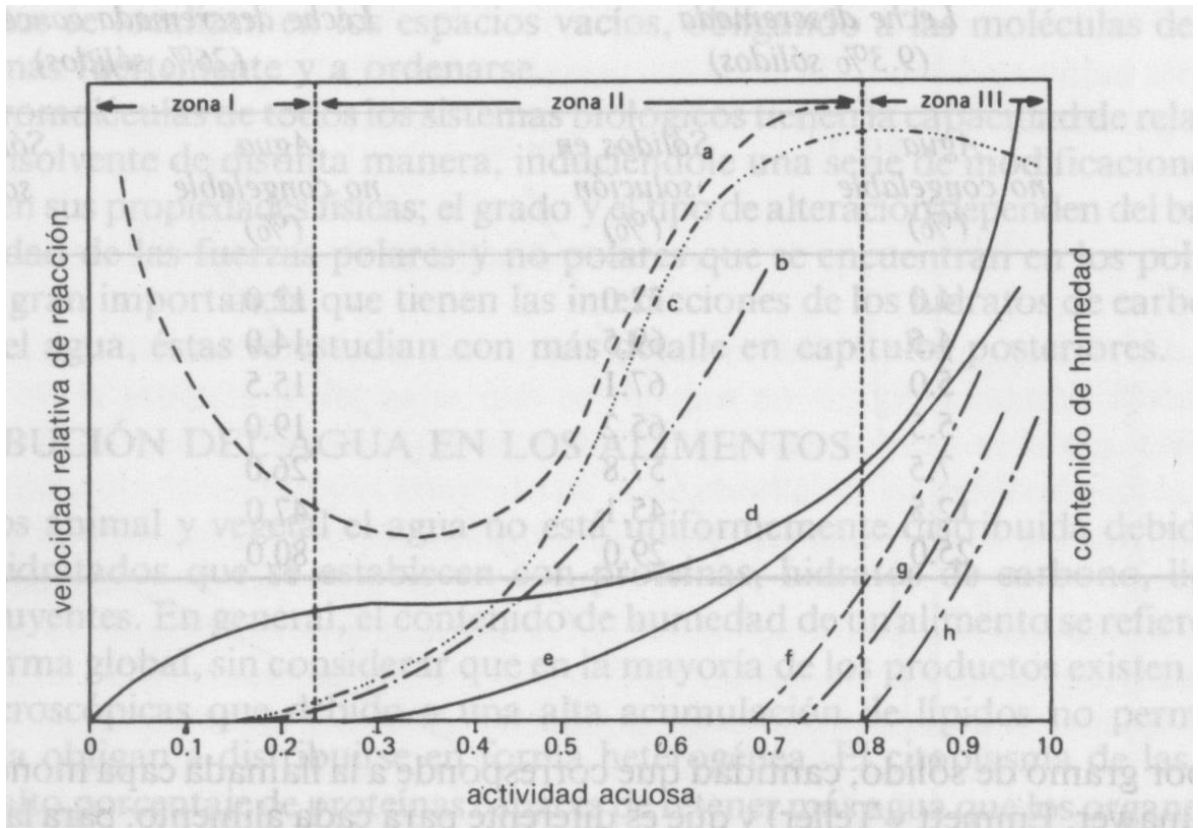
- 17) Curso sobre producción de perejil deshidratado, Agro Alternativo, <http://www.agroalternativo.com.ar/cursoperejil.htm>
- 18) Dirección de Mercadeo y Agroindustria Área Desarrollo de Producto, Licda Olga Marta Murillo, Tecnóloga de Alimentos. http://www.mercanet.cnp.go.cr/Desarrollo_Agroid/documentospdf/Cebolla_FTP.pdf
- 19) Programa de Apoyo a la Microempresa Rural de América Latina y el Caribe PROMER, <http://www.promer.org/getdoc.php?docid=661>.

XI. ANEXOS

Gráfica 13: Curvas típicas de las isothermas de adsorción y de desorción de los alimentos. (1)



Gráfica 14: Zonas hipotéticas que ubican el agua en un producto; zona III: libre; Zona II: capas más estructuradas y en microcapilares; Zona I: capa monomolecular BET. (1)



Cambios que ocurren en los alimentos en función de la actividad acuosa a 20°C: a, oxidación de lípidos; b reacciones hidrolíticas; c, oscurecimiento no enzimático; d, isoterma del contenido de humedad; e, actividad enzimática; f, crecimiento de hongos; g, crecimiento de levaduras, y h, crecimiento de bacterias. (1)

Figura 1: Esquema de diseño de intercambiador de calor y deshidratador de bandejas

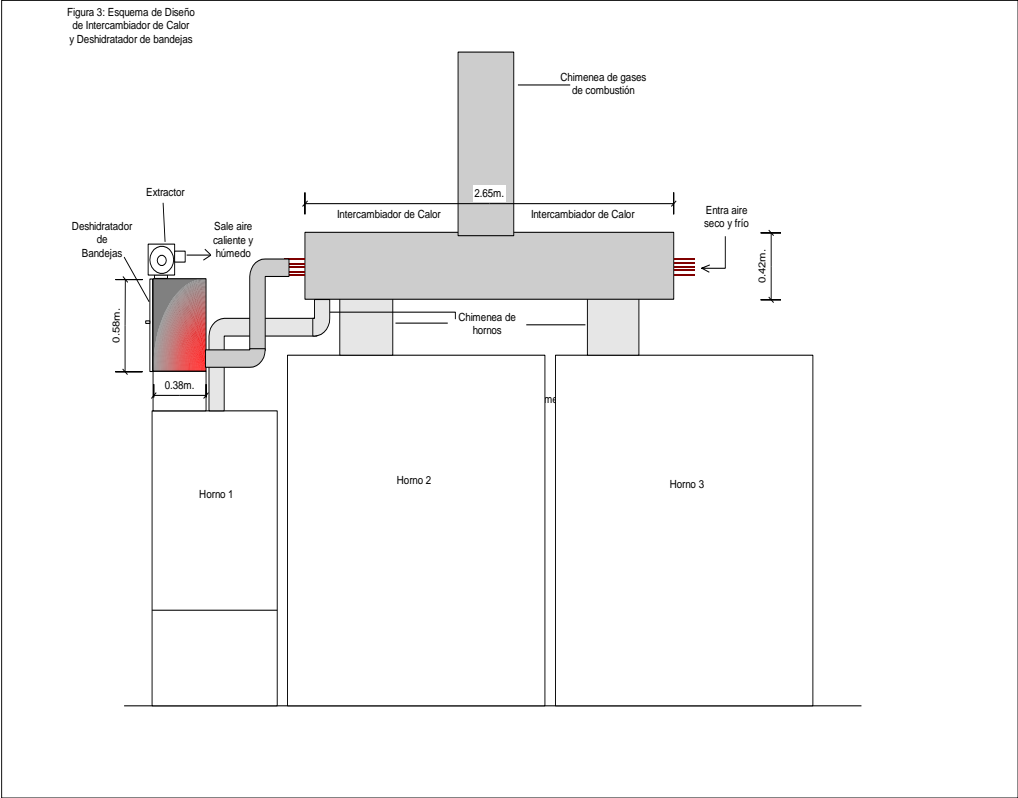


Figura 2: Secador tipo Kiln. (2)

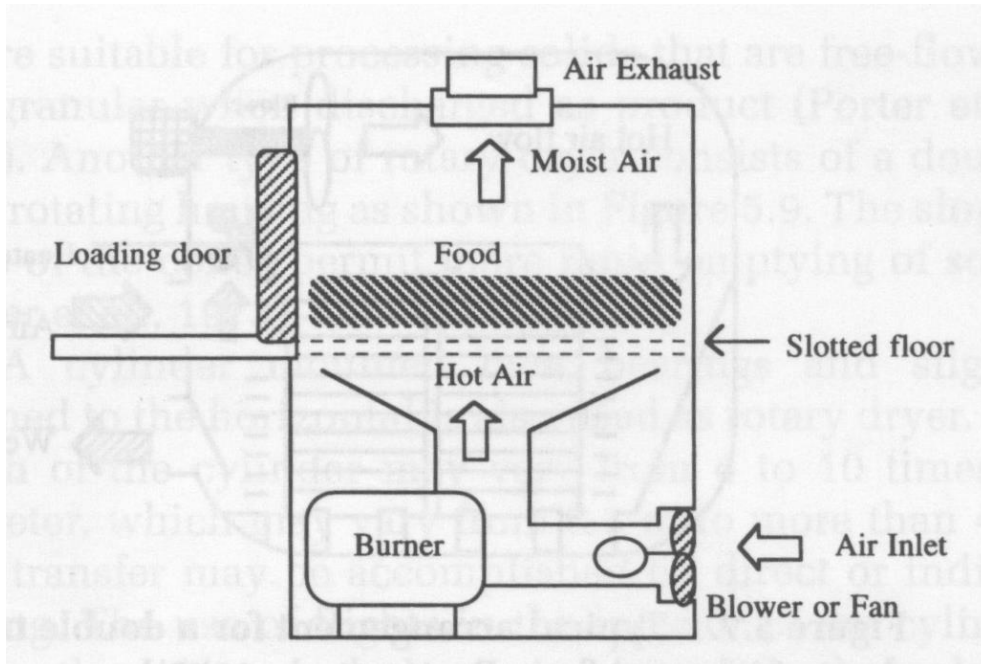


Figura 3: Configuración típica de un secador de bandejas de dos carros. (2)

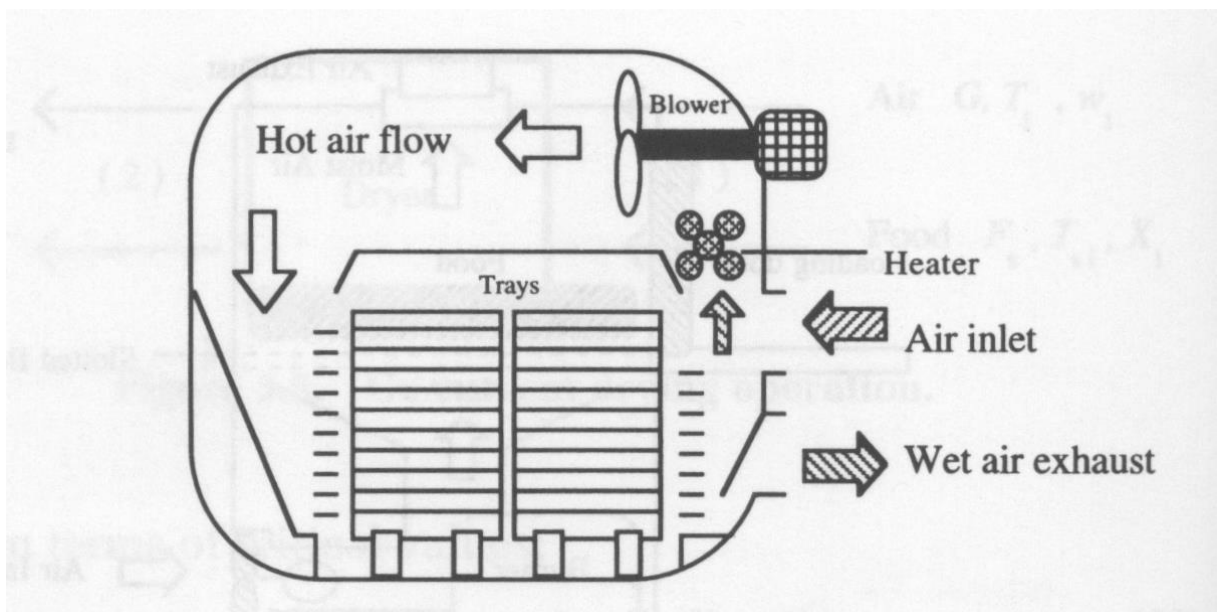


Figura 4: Configuración típica de un deshidratador de bandejas con calentadores auxiliares. (2)

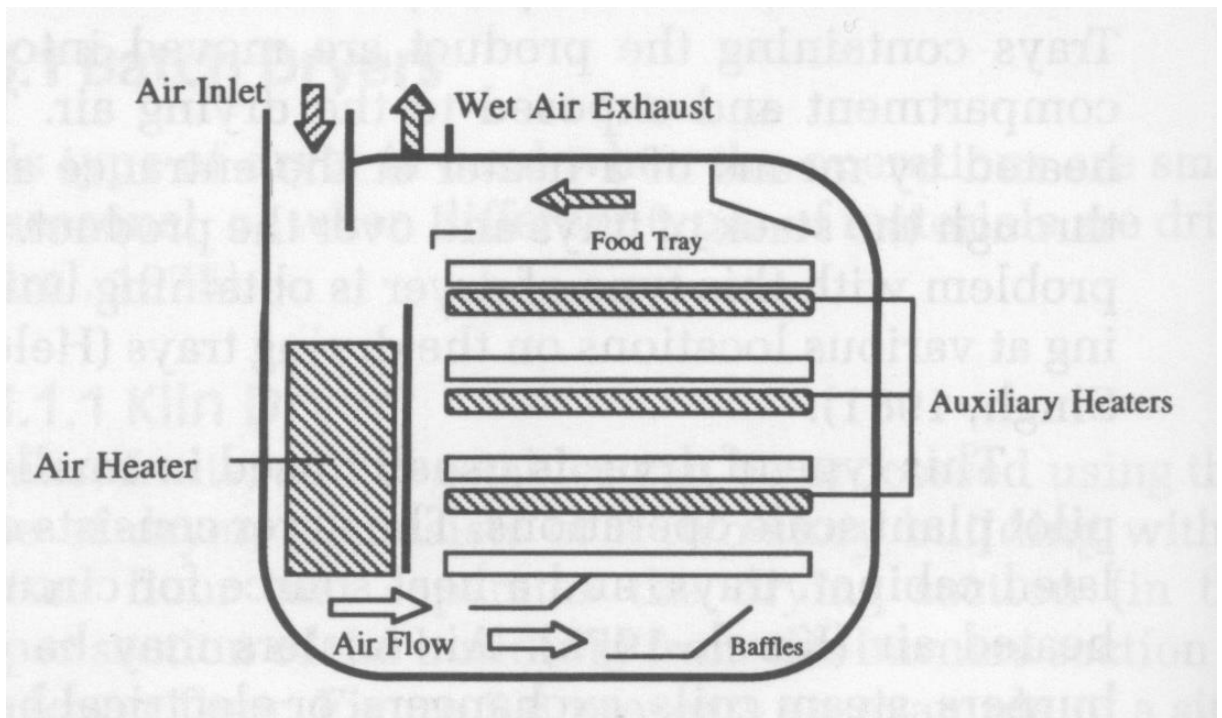


Figura 5: Secador de túnel con configuración de contracorriente. (2)

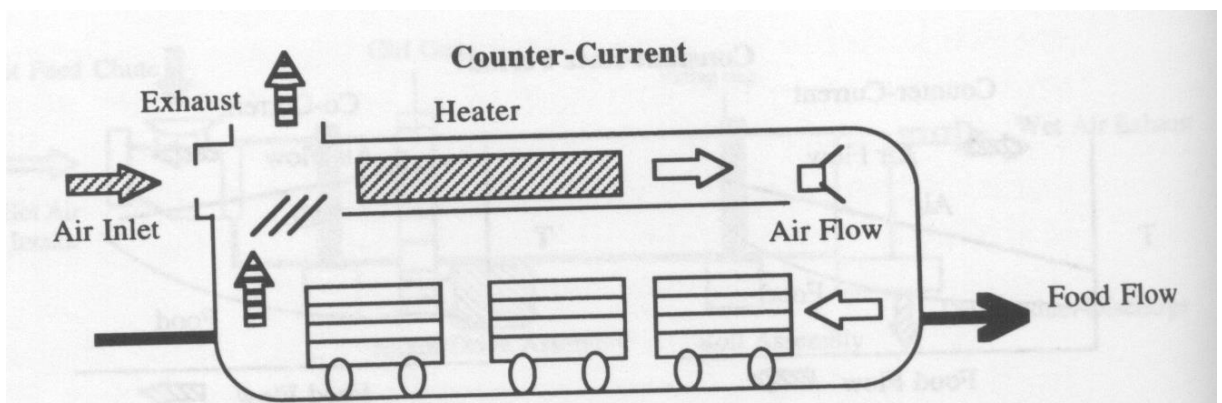


Figura 6: Secador de túnel con configuración de co-corriente. (2)

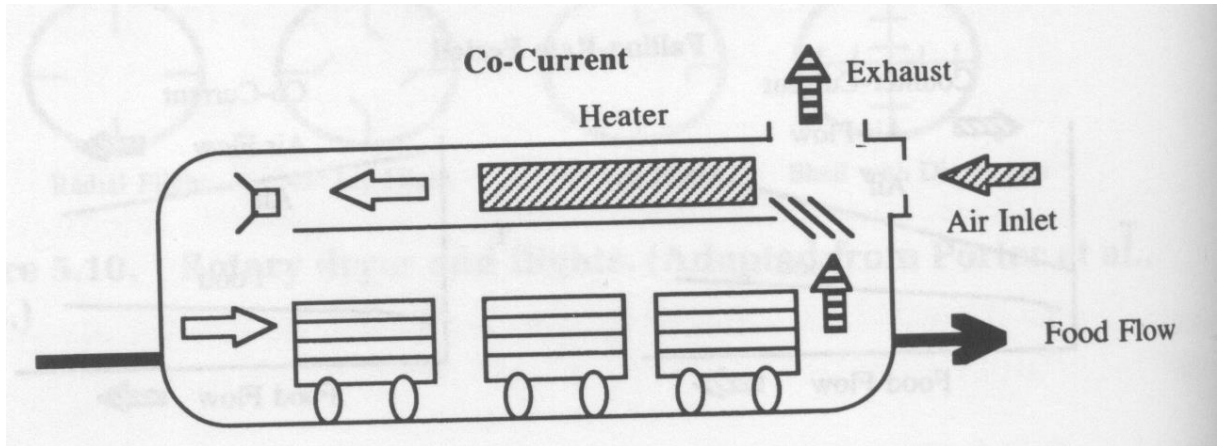
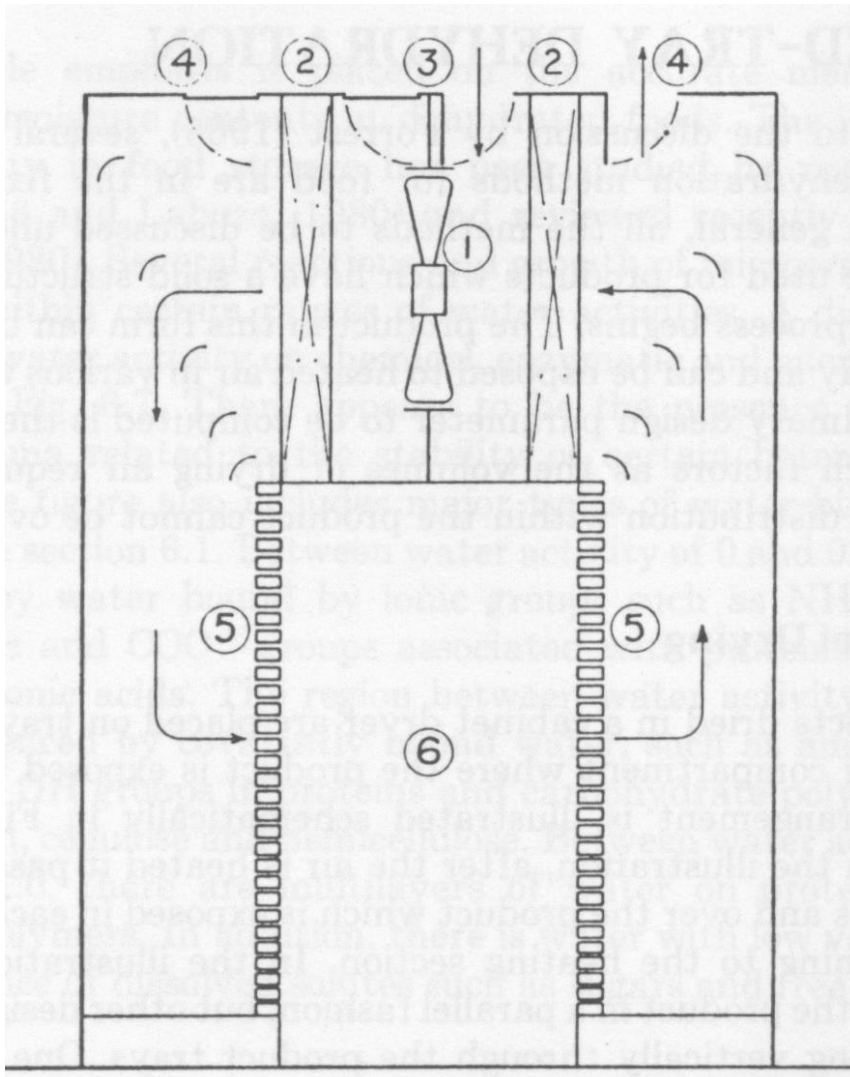


Figura 7: Ilustración esquemática de un secador de bandejas. (10)



1, Ventilador de circulación de aire completamente reversible; 2, baterías de calefacción; 3, entradas de aire; 4, salidas de aire; 5, paredes ajustables de paso de aire; 6, espacio para colocación de bandejas. (10)

