



FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS AGROPECUARIAS

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE DESHIDRATADOR DE  
TÚNEL CONTRACORRIENTE PARA FRUTAS Y VERDURAS

Trabajo de Titulación presentado en conformidad con los requisitos  
establecidos para optar por el título de Ingeniería en Producción Industrial

Profesor guía:  
Milene Díaz

Autor:  
Daniela Alejandra Villarroel Guevara

Año  
2007

# 1

## INTRODUCCIÓN AL SECADO Y DESHIDRATACIÓN.

En cualquier proceso de deshidratación de alimentos se debe tomar en cuenta cuáles son los aspectos energéticos y termodinámicos que se llevan a cabo durante el mismo.

Toda fruta y verdura está sujeta a cambios morfológicos producidos por factores termodinámicos, estos a su vez producen cambios en los valores nutritivos y organolépticos de los alimentos.

### 1.1 SECADO

Robert E. Treyball, en su libro “Operaciones con transferencia de masa”, se refiere al secado como “la extracción de humedad de una sustancia”<sup>1</sup>.

Es decir, el proceso de secado es la operación unitaria en la cual se procede a retirar, por medio de métodos artificiales o naturales, el agua que está contenida en los sólidos.

Un ejemplo muy claro de secado por método natural es el de los granos comestibles (fréjol, garbanzo, lenteja, etc.), los cuales, una vez cosechados son

---

<sup>1</sup> Robert E. Treyball, “Operaciones con transferencia de masa”, Capítulo XII, *Secado*. Pág. 653.

tendidos al sol donde pierden una gran cantidad de la humedad que lo conforma.

En este proyecto el método de secado de interés es la deshidratación por medios “artificiales”, en donde, utilizando métodos termodinámicos controlados, se puede extraer un porcentaje determinado de humedad, controlando igualmente las propiedades de los alimentos que determinan su calidad (color, aroma, sabor, capacidad de rehidratación, vida útil, etc.)

### **1.1.1 HUMEDAD Y AGUA**

El proceso de secado es una operación, básicamente, de transferencia de masa. Esta transferencia se da durante el contacto del sólido con el aire; el contenido de agua que se encuentra en el sólido se transfiere por evaporación hacia el gas; esto ocurre en base a la diferencia de presiones entre el vapor del sólido húmedo y el aire.

El mecanismo del proceso de secado depende considerablemente de la forma en la que el agua está relacionada con el sólido: mientras más compacto y molecularmente unido esté el alimento, más difícil será remover su humedad “Durante el secado el enlace de la humedad con el material se altera” <sup>2</sup>

Las formas de enlace de humedad con el sólido se clasifican en:

- químico,
- físico-químico,

---

<sup>2</sup> MSc. Ing. Luz María Contreras Velásquez, “Aspectos teóricos de la operación de secado y su aplicación en productos sólidos”, *Formas de enlace de la humedad con el material*.

- físico-mecánico.

La humedad que está ligada químicamente al sólido es de difícil remoción, es decir, es la que se une más estrechamente con el alimento en determinadas proporciones, denominadas *estequiométricas*, que son las relaciones cuantitativas del equilibrio de la materia (masa, volumen, número molecular, etc.). Este tipo de humedad puede eliminarse únicamente por medio del calentamiento del material a temperaturas extremadamente altas, o como resultado de una reacción química. Este tipo de humedad también es conocida como *agua molecular*; ésta no se considera como disponible y por lo tanto no contribuye a la reproducción de organismos microbianos.

Durante el proceso de secado se pueden eliminar únicamente la humedad enlazada con el material en forma físico-química (*agua/humedad ligada*) y físico-mecánica (*agua/ligada libre*). La Fig. 1.1 muestra la ubicación de la humedad ligada y libre dentro de una relación Humedad Relativa – Agua Saturada.

La más fácil de eliminar es el *agua libre*, que a su vez se divide en humedad de los macrocapilares (radio aproximado de 0.5mm) y de los microcapilares (radio aproximado de 1 $\mu$ m). Los macrocapilares se llenan de agua cuando el sólido está en contacto directo con esta, por ejemplo al sumergir un pedazo de pan en agua los macrocapilares se llenarán con el líquido. Por otro lado, los microcapilares se llenan de humedad tanto por contacto directo con el agua (de igual manera que los macrocapilares) como por medio de la adsorción de humedad del ambiente inmediato en el que se encuentre el sólido. La humedad

de los macrocapilares se puede eliminar fácilmente, no solamente por medio de la deshidratación, sino también por medio de métodos mecánicos como el prensado. Una forma sencilla de comprender la remoción del agua de los macrocapilares de un sólido es tomar el ejemplo de la extracción de jugo de naranja; al aplicar cierta presión sobre la estructura sólida, los enlaces de los macrocapilares con el resto de componentes de la fruta se rompen y el líquido es separado de la misma.

El *agua ligada*, aunque no es de fácil remoción como el *agua libre*, puede ser eliminada por medio del secado. El enlace físico-químico une dos tipos de humedad del sólido, estos difieren por la solidez del enlace con el material, estos tipos de humedad son:

- humedad ligada osmóticamente,
- humedad ligada por adsorción.

La *humedad ligada osmóticamente*, también llamada *humedad de hinchamiento*, es el agua que se encuentra dentro de las células del material y se retiene por medio de fuerzas osmóticas (atracción de iones a otros solutos del agua).

La segunda se retiene solidamente sobre la superficie y los poros del material. Esta *humedad de adsorción*, para ser eliminada requiere de un gas con una energía mucho mayor a la del aire que se utilizaría para eliminar la *humedad de*

*hinchamiento*. “La existencia de estos tipos de humedad especialmente se manifiesta en materiales coloidales y poliméricos.”<sup>3</sup>

Asimismo, el proceso de secado se puede clasificar en *continuo* y discontinuo. En el proceso continuo, el alimento a secar y el aire pasan de forma constante por el Deshidratador, mientras que el proceso discontinuo se refiere, en realidad, a una operación *semicontinua* debido a que, en este caso, se expone solamente a cierta cantidad de alimento dentro de una corriente continua de gas dentro del Deshidratador.

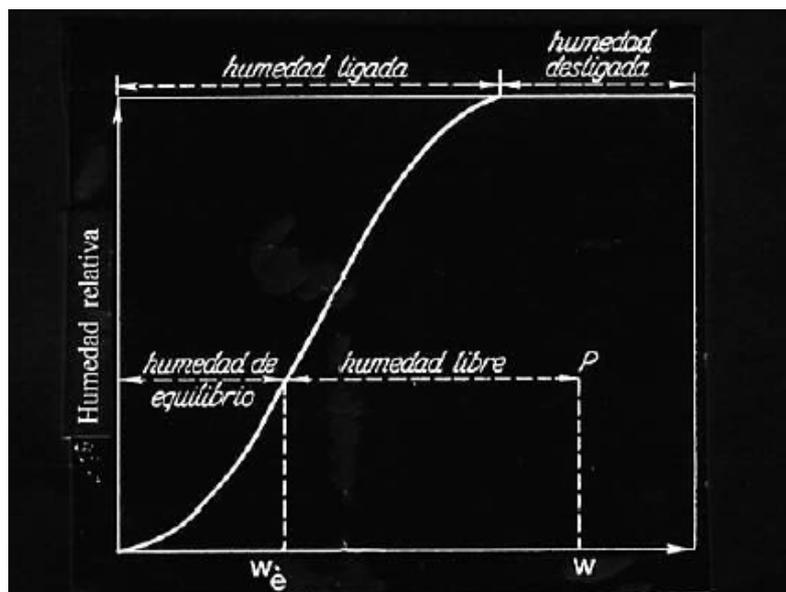


Fig. 1.1

#### Humedad Relativa

Este diagrama permite ver la ubicación de las distintas humedades dentro de la relación Humedad Relativa - Agua Saturada.

Fuente: “Secado de Sólidos”, Manuel Cortijo.

<sup>3</sup> A. Kasatkin. “Operaciones básicas y aparatos en la tecnología química”. T-I./Pág. 262-366.

### 1.1.1.1 CONTENIDO DE AGUA (CDA)

Existen dos definiciones fundamentales para el *contenido de agua*; éstas se presentan, matemáticamente, de la siguiente manera:

*Contenido de Agua – Base Seca.*

$$BaseSeca = \frac{Kg.Humedad}{Kg.SólidoSeco} \quad (1.1)$$

*Contenido de Agua – Base Húmeda.*

$$\frac{Kg.Humedad}{Kg.SólidoHúmedo} = \frac{Kg.Humedad}{Kg.Humedad + Kg.SólidoSeco} \quad (1.2)$$

### 1.1.1.2 HUMEDAD DE EQUILIBRIO

La naturaleza del sólido, su humedad y temperatura determinan el grado de presión de vapor que se ejerce sobre el mismo. Al exponer el alimento a una corriente de gas, en este caso aire, éste ganará una presión parcial de vapor mientras que el alimento la pierde debido a la evaporación (Ver Fig. 1.2). Este proceso continuará hasta que las presiones parciales del alimento y del gas se igualen en este punto se presenta el *equilibrio*. Aquí el contenido de humedad

del alimento será llamado *contenido de humedad de equilibrio* (He) y la presión reinante será denominada como *presión de equilibrio* (Pe).

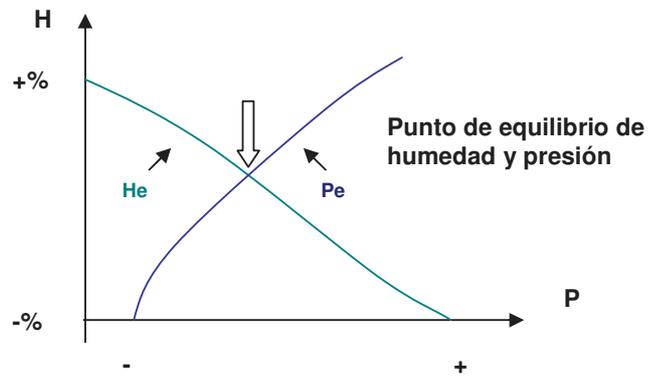


Fig. 1.2

#### *Punto de Equilibrio de Humedad y Presión*

El gráfico nos indica, en forma extremadamente sencilla, cómo la humedad disminuye de +% a -% cuando es expuesta a un gas, y cómo la presión aumenta de - a + hasta que llega al punto de equilibrio, representado por el cruce de las líneas Pe y He.

Autora: Daniela Villarroel Guevara.

### **1.1.1.3 HUMEDAD LIBRE**

Es el exceso de humedad de un sólido, en comparación con la humedad de equilibrio que se encuentra en contacto con una determinada masa de aire. En otras palabras, es la humedad que puede perder el material después de haber estado por un tiempo prolongado en contacto con el ambiente.

#### **1.1.1.4 HUMEDAD LIMITE**

Es la humedad de equilibrio de un sólido en contacto con una masa de aire de humedad relativa del cien por ciento. También se define como la humedad necesaria para que el sólido deje de comportarse como higroscópico.

Un sólido higroscópico es aquel en el que el agua tiene una presión de vapor menor que la del agua pura a la misma temperatura; el sólido higroscópico modifica la presión de vapor del agua que está ocluida entre sus poros o entre las partículas del mismo. Este tipo de sólido, en condiciones en las que la presión del vapor de agua del aire es mayor a la presión del sólido, tiende a absorber  $H_2O$  hasta alcanzar el equilibrio.

#### **1.1.1.5 HUMEDAD NO LÍMITE**

Es la diferencia entre la humedad del sólido y la humedad límite, ó la humedad libre del sólido en contacto con el aire saturado. En este caso el sólido se comporta como sólido húmedo.

Un sólido húmedo se define como aquel cuya presión de vapor de agua contenida en él es igual a la del agua pura a la misma temperatura. El sólido húmedo es totalmente inerte para el agua que lo acompaña, es decir que este sólido no adsorbe o absorbe  $H_2O$ .

La Figura 1.3., representa gráficamente la ubicación de las humedades a lo largo de la curva de humedad de equilibrio.

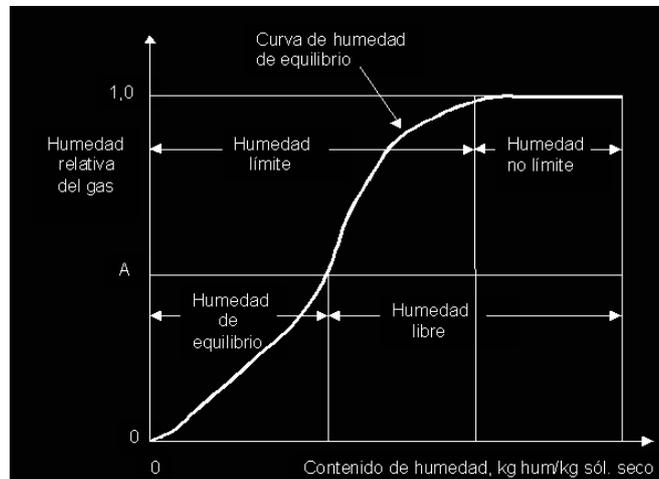


Fig. 1.3

#### *Humedad en el Proceso de Secado*

En la figura se pueden observar las diferentes etapas de humedad que se encuentran en un sólido seco, en una relación Humedad Relativa del Gas – Contenido de Humedad.

Fuente: "Secado de Sólidos", Manuel Cortijo.

### 1.1.2 HISTÉRESIS

La *histéresis* es un fenómeno por el cual el estado actual de un proceso no depende únicamente de lo que lo provoca, sino también de sus antecedentes, es decir, de los valores del mismo en etapas anteriores.

La histéresis también se define como la tendencia que tiene un material a mantener, por lo menos, una de sus propiedades en ausencia del estímulo que la ha generado.

En la deshidratación de alimentos la histéresis de un sólido no estará definida únicamente por el proceso de secado al que se lo someta, sino que también estará sujeta a los efectos de los tratamientos previos que se haya dado al material, y debido a esto el alimento tratará de retener algunas de sus propiedades originales.

En el secado de alimentos no solamente es primordial la longevidad del producto, sino también el hacer prevalecer las condiciones y propiedades nutritivas y organolépticas del alimento deshidratado.

Los sólidos tienen distintas características de humedad de equilibrio; estas características se basan en el modo de alcanzar el equilibrio por *adsorción* o *desorción*. Al mencionar adsorción y desorción nos referimos a los procesos de condensación y evaporación respectivamente.

La desorción de equilibrio es de gran interés en el proceso y operaciones de secado. La desorción de equilibrio mostrará siempre, para una presión de vapor determinada, el mayor de los contenidos de humedad de equilibrio.

La humedad que adquiere un alimento seco cuando ha sido expuesto a un ambiente en donde el aire tiene un contenido significativo de agua, se denomina como *humedad recuperada* o *agua recuperada*. Es necesario recordar que cuando el sólido toma agua del aire, sus presiones de vapor se igualan llegando al punto de humedad de equilibrio.

En el caso de los alimentos, en donde mantener al sólido con un contenido de humedad bajo es la prioridad, es imperante mantener al producto perfectamente cubierto, sellado y envasado, preferiblemente al vacío.

### 1.1.2.1 ADSORCIÓN Y DESORCIÓN

La *adsorción* es un fenómeno durante el cual las partículas se acumulan sobre una superficie. La sustancia que se adsorbe es el *adsorbato* y el sólido sobre el cual lo hace es el *adsorbente*.

La adsorción es un proceso por el cual átomos, iones o moléculas son atrapados o retenidos en la superficie de un material; el resultado es la formación de una película líquida o gaseosa en la superficie del material, ya sea este sólido o líquido. La cantidad de humedad que se acumula depende del equilibrio que se alcance entre el porcentaje de líquido que se adsorbe a la superficie, y el que se evapora hacia el medio circundante; lógicamente este equilibrio estará modificado, en gran parte, por la temperatura a la cual el sólido se encuentre sometido. Cuanto mayor sea la tasa de adsorción y menor la de desorción, mayor será la cantidad de superficie del sólido que será cubierta por el líquido adsorbido.

La transferencia de materiales hacia el interior y hacia el exterior de las células se da mediante la adsorción sobre la membrana celular, penetración en la misma y desorción en la superficie opuesta de la membrana.

La *desorción* es un fenómeno y proceso opuesto a la sorción (esto es adsorción o absorción), por medio del cual cierta cantidad de la sustancia sorbida es liberada. El término general *sorción* se usa para denotar la interacción agua-sustancia adsorbente.

### 1.1.3 ACTIVIDAD DE AGUA

J. G. Brennan, en su publicación “Las Operaciones en la Ingeniería de los Alimentos” indica que:

Al considerar la influencia del contenido de 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.<sup>4</sup>

Tomando en cuenta los tipos de agua y humedad que se encuentran en un alimento, su tipo de relación con el sólido y la forma en la que pueden ser eliminadas, es necesario destacar que la humedad que está más estrechamente ligada a las células del sólido no puede considerarse como agua fácilmente disponible como disolvente para diversos solutos.

En general, el agua es la materia prima para la reproducción de microorganismos, los mismos que son los causantes de la descomposición de los alimentos; en otras palabras, mientras mayor disponibilidad de agua se encuentre en el alimento, menor es la vida útil del mismo.

La *actividad de agua* es una propiedad fundamental de las frutas y verduras; un análisis sobre esta debe hacerse cada vez que se hable sobre un proceso de secado u otro tipo de conservación de alimentos.

---

<sup>4</sup> J.G Brennan, “Las Operaciones de la Ingeniería de los Alimentos”, Capítulo 13, *Deshidratación*. Pág. 377

La actividad de agua viene definida por la siguiente ecuación:

$$a_w = \frac{P_v}{P_w} \quad (1.3)$$

Donde:

- $P_v$  es la presión de vapor de agua ejercida por el sólido húmedo.
- $P_w$  es la presión de vapor del agua pura, a la misma temperatura.

Asimismo, esta expresión describe la relación de humedad relativa de una mezcla aire-vapor de agua, relación que se considera altamente en un proceso de secado.

Cuando el sólido se encuentra en equilibrio con la atmósfera del medio circundante, la actividad de agua del mismo será numéricamente igual a la de la humedad relativa del medio.

La representación gráfica del contenido de agua en función a la actividad de agua se conoce como *isoterma de sorción*, la cual fue mencionada anteriormente.

La isoterma de sorción puede ser preparada por medio de adsorción (colocando un producto seco en un entorno de humedad creciente) o por desorción (colocando un producto húmedo en contacto con un entorno de

humedad decreciente); este efecto se conoce como histéresis, el cual también fue revisado anteriormente.

### 1.1.3.1 REGIONES DE LAS ISOTERMAS

J.G. Brennan, explica que: “las isothermas de los alimentos se dividen frecuentemente en tres regiones, denominadas A, B y C”.<sup>5</sup>

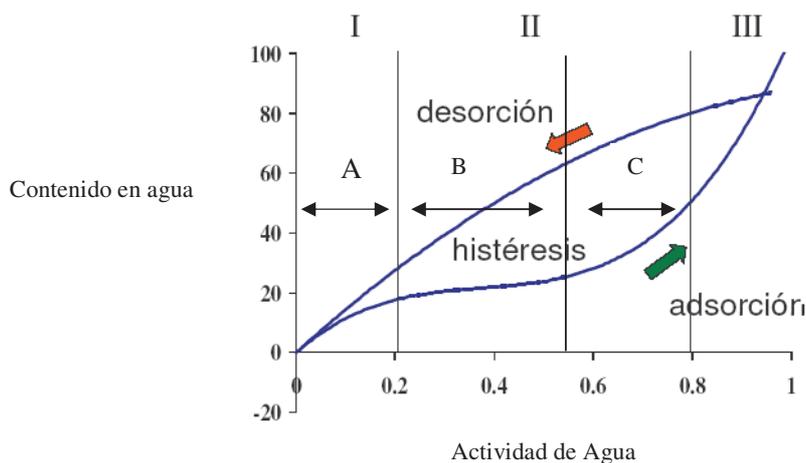


Fig. 1.4

#### *Isothermas de Adsorción y Desorción*

En el diagrama se puede observar la posición de las isothermas de adsorción y desorción con respecto a la histéresis. También está claramente identificado cómo la desorción es equivalente a una disminución de humedad, mientras que la adsorción está representada por un aumento de líquido en la superficie del sólido. También se describe, respectivamente, el incremento y disminución de la actividad de agua en las isothermas de adsorción y desorción.

Fuente: Monografías.com. Clave: Histéresis

En la Fig. 1.4 podemos observar estas regiones. En la región A, las moléculas de agua están fuertemente atadas a ciertos puntos del sólido; aquí podemos

<sup>5</sup> J. G. Brennan, “Las Operaciones de la Ingeniería de los Alimentos”, Capítulo 13, *Deshidratación*. Pág. 379

encontrar humedad ligada químicamente: *agua molecular*, ésta corresponde a una actividad de agua en un intervalo de 0 a 0,35 (DWB). Como ya se ha considerado anteriormente, este tipo de agua no está disponible como disolvente y por lo tanto no contribuye a la actividad de microorganismos.

En la región B se encuentra agua que todavía puede estar ligada al sólido pero no tan fuertemente como en la región A; el agua que encontramos aquí está atada al material físico-químicamente y se la conoce como *agua ligada*. Ésta es una región considerada como *multicapa*, mientras que a la región A se la conoce como *monocapa*. A la región B se le da el nombre de multicapa debido a que en ella se pueden encontrar distintos tipos de agua segmentados en niveles, es decir que aquí se puede encontrar humedad ligada químicamente, físico-químicamente y físico-mecánicamente, mientras que en la región A solo se encuentra agua ligada químicamente. Los valores de la monocapa suelen estar ubicados en niveles de contenido de agua de 0 y 0,2 (CDA). Por otro lado, la región C debe ser considerada “como una en la que la disminución de la presión del vapor de agua se debe a razones estructurales y efectos de disolución”<sup>6</sup>; esta región está conformada, en su mayoría, por agua ligada físico-mecánicamente, la misma que es de fácil remoción y altamente disponible para la actividad microbiana.

Sin embargo, no es posible hacer una distinción severa entre las capas ya que estos efectos se dan a lo largo de toda la isoterma. Es debido a esto que, por encima de la región A, la disminución de la presión de vapor de agua del sólido

---

<sup>6</sup> J.G. Brennan, “Las Operaciones de la Ingeniería de los Alimentos”, Capítulo 13, *Deshidratación*. Pág. 379

húmedo se debe a enlaces débiles, a la influencia de los capilares (macro y microcapilares) en la estructura del sólido y a la existencia de sólidos solubles en disolución. “Todos estos efectos se dan a riquezas de aguas bajas, < 1,0 DWB”<sup>7</sup>. Generalmente, el contenido de agua que permite la mayor estabilidad en el sólido es igual al de la monocapa.

La mayor parte de los alimentos presentan presiones de vapor de agua bastante cercanas a las del agua pura cuando el contenido de la misma es mayor a 1,0 (DWB). Es necesario tener en cuenta que la temperatura tiene gran influencia y afecta al comportamiento de sorción de los sólidos húmedos y alimentos en general.

La representación matemática más conocida y utilizada de las isothermas de sorción es la expresión conocida como *isoterma BET*, que tiene la siguiente forma:

$$\frac{a_w}{(1 - a_w)W} = \frac{1}{W_m C} + \frac{a_w(C - 1)}{W_m} \quad (1.4)$$

Donde:

- W = contenido total de agua (CDA).
- W<sub>m</sub> = contenido en agua de la monocapa.
- a<sub>w</sub> = actividad de agua.
- C = constante.

---

<sup>7</sup> J.G. Brennan, “Las Operaciones de la Ingeniería de los Alimentos”, Capítulo 13, *Deshidratación*. Pág. 379

Esta representación matemática de la isoterma es válida únicamente en rangos de  $a_w$  0,05-0,45.

El conocimiento sobre el proceso de sorción y sus características son de vital importancia ya que así se puede predecir y determinar la vida útil del producto; también facilita la predicción de los tiempos de secado y la energía necesaria para este proceso. Es necesario considerar que en el diseño de los sistemas de secado por aire caliente, no se puede disminuir el contenido de agua del alimento por debajo del que se tiene cuando se halla en equilibrio con el aire utilizado para este proceso (a una temperatura y humedad específicas). Cuando existe la necesidad de que el contenido de agua del producto sea más bajo, será imperante utilizar un aire de secado con menor humedad. Muchas veces esto implica utilizar aire con mayor temperatura, lo cual no solamente involucra un mayor consumo de energía sino también la alteración del alimento. Para evitar este fenómeno se puede proceder a realizar el secado a presiones menores a la atmosférica. Para secar el alimento hasta contenidos de agua muy bajos, cercanos o iguales a los de la monocapa, se debe suministrar una energía bastante mayor al calor latente de vaporización.

## 1.2 MECANISMOS DE SECADO

En las operaciones de secado es necesario eliminar el agua que se encuentra tanto en la superficie como en el interior del sólido húmedo. Cuando la humedad es elevada, la evaporación se presenta en la superficie completamente mojada del material; este líquido se renueva constantemente por la difusión que se da desde el interior del alimento, y la velocidad de secado permanece constante sin tener dependencia alguna de la humedad total del alimento; esta etapa se denomina *periodo de velocidad de secado constante*, y se prolonga hasta llegar a la humedad crítica.

En este punto se elimina principalmente el agua ligada físico-mecánicamente la que, como se ha visto anteriormente, es de fácil remoción y es la primera en ser erradicada durante el proceso de deshidratación.

La *humedad crítica* es el punto en el cual una etapa inicia y la otra termina; también es conocida como *punto de saturación de la fibra del material*.

Cuando la humedad del sólido es inferior a la humedad crítica, la difusión desde el interior del sólido no puede suministrar todo el líquido que se evapora en la superficie; es gracias a esto que la velocidad de evaporación empieza a disminuir; también debe considerarse que, debido a la remoción de líquido, el material empieza a experimentar un fenómeno de encogimiento que incrementará en el transcurso del proceso.

Esta etapa se conoce como *primer periodo de secado de velocidad decreciente*, y se reconoce gracias a la aparición de zonas secas en la superficie del sólido.

Es aquí donde toda el agua ligada mecánicamente ha sido removida y se da comienzo a la eliminación del líquido enlazado físico-químicamente.

A continuación, la velocidad de secado prosigue con su descenso: la evaporación se produce dentro del sólido alejándose constantemente de la superficie, difundiendo posteriormente el vapor; esta etapa se denomina *segundo período de velocidad decreciente*. De la misma manera que en la etapa anterior se produce un fenómeno de encogimiento; sin embargo, es aquí donde este fenómeno se observa con mayor facilidad. Se debe recalcar que en esta etapa el agua ligada físico-químicamente ha sido eliminada hasta el punto deseado y establecido en el deshidratador, de acuerdo con los requerimientos de conservación del alimento.

En todo momento la velocidad de secado está en función de la transmisión de calor y de la velocidad de transferencia de la materia (temas que serán tratados posteriormente), parámetros que dependen del tipo y características del material. En la Fig. 1.5 se puede apreciar la representación gráfica de la velocidad de secado de dos materiales; la curva 1 corresponde al secado de arena y la curva 2 al secado de jabón granular. Si bien las curvas de secado de materiales granulares no representan perfectamente cuál es el comportamiento de los alimentos, sí presentan similitudes lo cual provee una idea clara de lo que ocurre durante el secado de frutas y verduras.

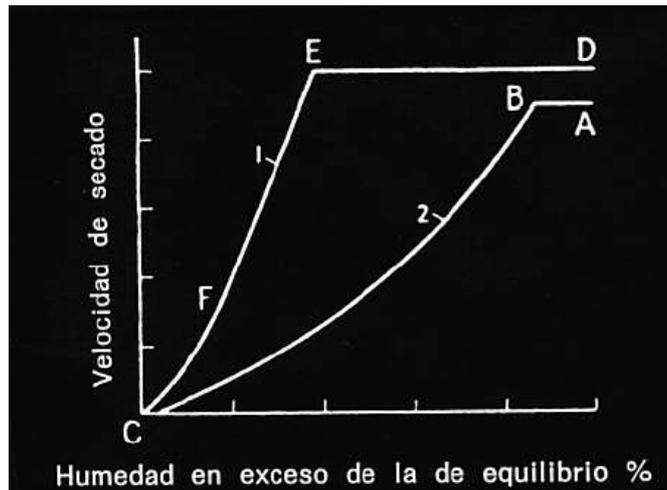


Fig. 1.5

*Curvas de secado de material sólido granular.*

Fuente: "Secado de Sólidos", Manuel Cortijo.

En la curva 2 se presentan dos zonas de secado perfectamente definidas:

Tramo AB:

- velocidad constante,
- independiente de la humedad.

Tramo BC:

- corresponde a un descenso continuo de la velocidad de secado,
- la velocidad tiene una relación lineal con la humedad.

En el punto B finaliza el Tramo AB y se da inicio al Tramo BC; es aquí donde se presenta el punto crítico.

En la curva 1 se distinguen tres periodos de velocidad de secado:

Tramo DE:

- velocidad de secado constante.

Tramo EF:

- línea recta que indica el primer periodo de secado de velocidad decreciente,
- la velocidad varía linealmente con la humedad.

Tramo FC:

- segundo periodo de velocidad decreciente,
- no existe relación lineal entre la humedad y la velocidad de secado.

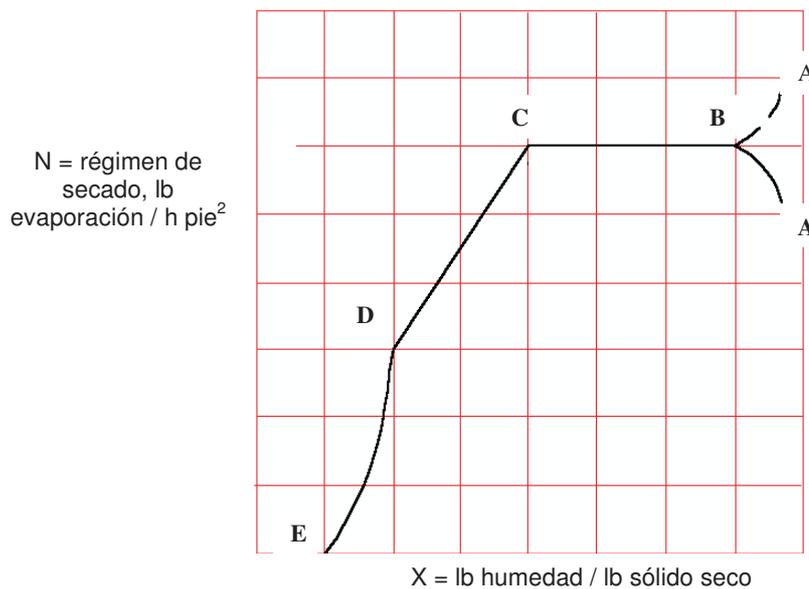


Fig. 1.6

*Curva típica del régimen de secado, condiciones constantes de secado.*

Fuente: "Aspectos teóricos de la operación de secado y su aplicación en productos sólidos", MSc. Luz María Contreras Velásquez.

La Fig. 1.6 muestra una curva típica de secado, cada uno de los tramos de la misma se corresponden exactamente al de la curva 2 de la Fig. 1.5, excepto por el tramo AB que representa un *ajuste inicial* en el proceso de secado. BC representa al período de velocidad constante; CD al primer período de velocidad decreciente y DE al segundo periodo de velocidad decreciente.

### 1.2.1 MOVIMIENTO DE LA HUMEDAD DENTRO DEL SÓLIDO

Al momento de presentarse la evaporación en la superficie del sólido, debe existir un movimiento de humedad desde el interior del material hacia la superficie del mismo.

“La naturaleza del movimiento influye en el secado en los periodos de caída del régimen”<sup>8</sup>.

A continuación se presentan algunas de las teorías que explican el movimiento de la humedad del interior del sólido hacia la superficie.

- Difusión Líquida: Se puede producir la difusión de la humedad líquida debido a los gradientes de concentración entre las profundidades del sólido, donde la concentración es alta, y la superficie donde es baja.
- Movimiento capilar: La humedad no límite en sólidos porosos, como es el caso de los alimentos, se traslada a través de los capilares e intersticios

---

<sup>8</sup> Menon y Mujumdar, “Drying of Solids”, McGraw Hill, Montreal-Canada 1992

de los sólidos mediante un mecanismo que implica tensión superficial. Los capilares se extienden desde pequeños receptáculos dentro del sólido hasta la superficie de secado. A medida que se lleva a cabo el secado, al principio la humedad se traslada por capilaridad hacia la superficie con suficiente rapidez, siendo constante el régimen de secado.

- Difusión de vapor: Especialmente si se suministra calor a una superficie de un sólido mientras en otra el secado continúa, se puede evaporar la humedad debajo de la superficie, difundiéndola hacia fuera como vapor.
- Presión: Durante el secado, debido a la concentración de las capas externas del sólido, se puede compeler la humedad hacia la superficie.

# 2

## TRANSFERENCIA DE CALOR Y MASA.

En todo proceso de secado se pueden observar fenómenos de transferencia de calor y masa; transferencia de calor del aire de deshidratación al sólido húmedo, transferencia de masa del agua interna del sólido al aire de secado, etc. Es debido a esto que un estudio sobre dichos fenómenos se presenta a continuación.

### 2.1 TRANSFERENCIA DE CALOR

Considerando que el Deshidratador de Túnel Contracorriente es un equipo que utiliza aire caliente para llevar a cabo el secado de alimentos, es absolutamente necesario, y justificable, realizar un estudio sobre la transferencia de calor con el fin de comprender parte de los fenómenos termodinámicos que se presentan durante el proceso de secado.

En primer lugar, debe tomarse en cuenta el fenómeno termodinámico básico al que nos referimos al hablar de *transferencia de calor*, el cual es conocido como: *equilibrio térmico*.

#### 2.1.1 EQUILIBRIO TÉRMICO

Este fenómeno puede ser explicado de manera sucinta y sencilla mediante el siguiente ejemplo:

Un recipiente que contiene agua a altas temperaturas recibirá la energía calorífica del agua, igualando su temperatura a la del líquido; por otro lado, si

se añade agua fría al recipiente, el líquido con mayor cantidad de calor sufrirá un descenso hasta llegar a un balance entre las dos temperaturas; con el paso de los minutos, el recipiente también adoptará, gradualmente, la nueva temperatura producto de la mezcla de los líquidos frío y caliente.

A pesar de que la interacción de temperaturas del ejemplo es de naturaleza "líquido-líquido", algo muy similar sucede en el proceso de secado, cuya interacción es "sólido-gas", en donde la parte sólida se considerará como el material húmedo a deshidratar y la parte gaseosa es la representación del aire caliente utilizado en el proceso de deshidratación. El fenómeno de equilibrio térmico que se da en el secado de alimentos es, en pocas palabras, el siguiente:

El sólido húmedo ingresa en el túnel de secado, donde una corriente de aire caliente pasará directamente sobre la superficie del alimento; esto producirá que el agua que se encuentra tanto en la superficie como en el interior del sólido iguale su temperatura con la del aire, evaporándose y dando paso al proceso de deshidratación.

### **2.1.2 CONVECCIÓN**

En física y en termodinámica se estudia que el calor se transmite por conducción, convección y radiación. Si existe una diferencia de temperatura en el interior de un líquido o un gas, es casi seguro que se producirá un movimiento del fluido. Este movimiento transfiere calor de una parte del fluido a otro por un proceso llamado *convección*.

En el secado de alimentos por medio de equipos de deshidratación, como un Túnel Contracorriente, se presenta este fenómeno de convección.

La convección es el mecanismo de transferencia de calor a través de un fluido, lo cual produce un movimiento masivo del mismo. En la convección existe

movimiento de fluido a nivel macroscópico, entendiendo por macroscópico un movimiento de volúmenes relativamente grandes de fluido, mientras que en la conducción existe a nivel microscópico, atómico o molecular.

La velocidad de transferencia de calor de un fluido es mucho mayor por convección que por conducción. Cuanto mayor es la velocidad del fluido, mayor es la velocidad de transferencia de calor.

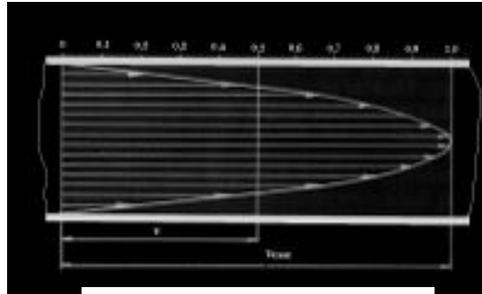
Sin embargo, existen límites en cuanto a transferencia de calor se refiere, esto dependerá directamente de la cantidad de calor que emane la fuente y de la cantidad de flujo de aire que atraviese la fuente calorífica.

La transferencia de calor por convección depende de las propiedades del fluido, de la superficie en contacto con el fluido y del tipo de fluido. Entre las propiedades del fluido se encuentran: la viscosidad dinámica  $\mu$ , la conductividad térmica  $k$ , la densidad  $\rho$ , la viscosidad cinemática  $\nu$ . Entre las propiedades de la superficie que intervienen en la convección están la geometría de corte del sólido y la aspereza. El tipo de flujo, ya sea laminar o turbulento, también influye en la velocidad de transferencia de calor por convección.

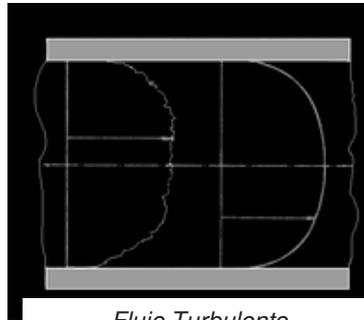
El *flujo turbulento*, o corriente turbulenta, es el movimiento de un fluido que se da en forma caótica, es decir que las partículas se mueven en forma completamente desordenada y las trayectorias de las partículas forman unos pequeños remolinos aperiódicos; un ejemplo de fluido turbulento es la caída de agua en un canal que tiene una gran pendiente. Ver Fig. 2.1.

Se denomina corriente laminar o *flujo laminar*, al movimiento completamente ordenado de un fluido, de manera que este se traslade en láminas paralelas o si la corriente tiene lugar entre dos planos paralelos, o en capas cilíndricas coaxiales sin mezclarse entre sí como es el caso de los tubos capilares. Este tipo de flujo es el que se presenta en el proceso de secado de alimentos, debido al desplazamiento de agua desde el interior del sólido hacia la capa

superficial por medio de los capilares por lo cuales se encuentra conformado el material. Ver Fig. 2.1.



*Flujo Laminar*



*Flujo Turbulento*

Fig. 2.1

*Distribución de velocidades de un fluido dentro de un tubo (Comparación entre flujo laminar y turbulento).*

Fuente: Wikipedia, la enciclopedia libre. [www.wikipedia.com](http://www.wikipedia.com)

La velocidad de transferencia de calor por convección es siempre proporcional a la diferencia de temperatura entre la superficie y el fluido. La *ley de enfriamiento de Newton* representa a esta relación en forma matemática.

$$\dot{q} = h(T_s - T_f) \quad (2.1)$$

Ó,

$$\dot{Q} = h \times A_s (T_s - T_f) \quad (2.1)$$

Donde:

- $T_s$  es la temperatura de la superficie en contacto con el fluido.
- $T_f$  es la temperatura del fluido alejado por completo de la superficie.
- $h$  es el coeficiente de convección. (cal/s.cm<sup>2</sup>. °C)
- $\dot{Q}$  es la velocidad de transferencia del calor. (KJ/s)
- $\dot{q}$  es el flujo de calor. (cal/s. cm<sup>2</sup>)
- $A_s$  es el área de la superficie de contacto. (m)

La influencia de las propiedades del fluido, de la superficie y del flujo se cuantifica en el *coeficiente de película* o coeficiente de transferencia de calor por convección ( $h$ ).

### 2.1.2.1 CONVECCIÓN FORZADA

La convección tiene dos clasificaciones:

- *Convección forzada*: Es aquella en la se obliga al líquido a fluir mediante medios externos tales como un ventilador o una bomba. Este tipo de convección es el que se encuentra en el secado de alimentos utilizando un Deshidratador de Túnel.
- *Convección libre*: Aquí el movimiento del fluido es resultado de la acción de medios naturales, como el efecto de flotación, el cual se evidencia por el ascenso del líquido caliente y el descenso del líquido frío provocado por la diferencia de densidades.

El coeficiente de convección  $h$  se calcula por medio del *número de Nusselt* ( $Nu$ ).

$$Nu = \frac{(hLc)}{k} \quad (2.3)$$

∴

$$h = \frac{(Nu \times k)}{Lc} \quad (2.4)$$

Para el cálculo del Número de Nusselt ( $Nu$ ) es necesario distinguir entre convección forzada y libre. El fenómeno de transferencia de calor, en el secado de alimentos, se da básicamente por medio de convección forzada.

En convección forzada el número de Nusselt se calcula en función del número de Reynolds y de Prandtl.

*Número de Reynolds.*

El número de Reynolds solo se utiliza en convección forzada y representa la relación que existe entre las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas que actúan sobre un elemento de volumen de un fluido. Es un indicativo del tipo de fluido (laminar o turbulento).

En otras palabras, el *Número de Reynolds* nos permite predecir el tipo de flujo sin que sea imperante observarlo<sup>9</sup>.

Esto es muy útil en el caso de este prototipo de estudio, ya que, a pesar de poseer una pantalla transparente que permite la observación del proceso, el fluido encargado del secado es aire, el cual es incoloro, lo que imposibilita la observación del mismo.

Un valor del número de Reynolds superior a 2000 indica un régimen turbulento, mientras que valores menores a 2000 indican régimen laminar.

$$Re = \frac{V \times D}{\nu} \quad (2.5)$$

---

<sup>9</sup> Robert L. Mott, *Mecánica de Fluidos Aplicada*, Cap. 8, *Número de Reynolds, flujo laminar y flujo turbulento*, Pág. 222, Ed. Prentice Hall.

Ó,

$$Re = \frac{\rho \times V \times D}{\mu} \quad (2.6)$$

Donde:

- $V$  es la velocidad de flujo del fluido a una distancia lo suficientemente alejada de la superficie. (m/s)
- $D$  es el diámetro, determinado por la geometría de corte del sólido (bordes). (m)
- $\mu$  es la viscosidad absoluta. (s/m<sup>2</sup>)
- $\rho$  la densidad. (Kg/m<sup>3</sup>)
- $v$  la viscosidad del fluido. (m/s)

*Número de Prandtl.*

Representa la relación que existe entre la difusividad molecular de la cantidad de movimiento y la difusividad molecular del calor o entre el espesor de la capa límite de velocidad y la capa límite térmica.

El  $Pr$  es del orden de 10 para el agua. Los valores del número de Prandtl para los gases se encuentran alrededor de 1, lo que indica que tanto la cantidad de movimiento como de calor se difunden por el fluido a una velocidad similar.

$$Pr = \frac{Cp \times \mu}{k} \quad (2.7)$$

Donde:

- $Cp$  es el calor específico a presión constante. (KJ/Kg•K)
- $\mu$  es la viscosidad absoluta. (s/m<sup>2</sup>)
- $k$  es la conductividad térmica. (W/m•K)

Estos dos números (Reynolds y Prandtl) permiten conformar una nueva relación junto con el número de Nusselt, el resultado es el siguiente:

$$Nu = f(Re, Pr) \quad (2.8)$$

*Número de Nusselt.*

El número de Nusselt representa la relación que existe entre el calor transferido por convección a través del fluido y el que se transferiría si solo existiese conducción.

Para el cálculo del número de Nusselt se utilizará la fórmula general tomando en consideración la incidencia de los números de Reynolds y Prandtl.

$$Nu = \frac{h \times D}{k} \quad (2.9)$$

Con el cálculo de cada uno de los números adimensionales expresados se vinculan los fenómenos que permiten el cálculo final del coeficiente de transferencia de calor por convección.

La siguiente es una expresión bastante utilizada del número de Nusselt:

$$Nu = 0.023 \times Re^{0.8} \times Pr^{1/3} \quad (2.10)$$

## **2.2 TRANSFERENCIA DE MASA**

La transferencia de masa es un *fenómeno de transporte*, en donde las moléculas de una determinada sustancia se trasladan hacia un nuevo elemento.

Los fenómenos de transporte tienen lugar en aquellos procesos, conocidos como procesos de transferencia, en los que se establece

el movimiento de una propiedad ( masa, momentum o energía) en una o varias direcciones bajo la acción de una fuerza impulsora<sup>10</sup>.

Mendoza Cabral, atribuye la importancia de la transferencia de masa al hecho de que la mayoría de procesos químicos requieren de una purificación inicial de las materias primas o una separación final de los productos en subproductos y el método para llevar a cabo estos procesos es por medio de la transferencia de masa.

Asimismo, menciona la importancia de la transferencia de masa en el costo final de producción.

Con frecuencia, el costo principal de un proceso deriva de las separaciones (Transferencia de masa). Los costos por separación o purificación dependen directamente de la relación entre la concentración inicial y final de las sustancias separadas; si esta relación es elevada, también serán los costos de producción<sup>11</sup>.

### **2.2.1 FUNDAMENTOS DE LA TRANSFERENCIA DE MASA**

La transferencia de masa produce un cambio en la composición de soluciones y mezclas por medio de métodos que no implican reacciones químicas. Especialmente, se caracteriza por desplazar una sustancia a través de otra, u otras, a escala molecular. Cuando se ponen en contacto dos fases de diferente composición, la sustancia que se difunde (en este caso el líquido del sólido húmedo) abandona una región de alta concentración y se transfiere a otro de baja concentración (el aire caliente de secado).

Tanto para la transferencia de masa como para la transferencia de calor se utiliza el mismo tipo de ecuación. En esta ecuación la velocidad de transferencia de masa depende de una fuerza impulsora (diferencia de concentración) sobre

---

<sup>10</sup> Mendoza Cabral Néstor, "Seminario: Transferencia de calor y masa", *Introducción*.

<sup>11</sup> Mendoza Cabral Néstor, "Seminario: Transferencia de calor y masa", *Introducción*.

una resistencia que indica la dificultad de las moléculas para transferirse de un medio u otro. Esta resistencia se expresa como una constante de proporcionalidad denominada *difusividad de masa*. Un valor elevado de esta constante indicará que las moléculas se difunden fácilmente en el medio.

Un factor de influencia en la velocidad de transferencia de masa es el tipo de flujo del líquido. Treyball lo explica de la siguiente manera:

Como el movimiento turbulento es rápido, la transferencia de masa en la región turbulenta también es rápida, mucho más que aquella resultante de la difusión molecular en la película laminar<sup>12</sup>.

### **2.2.1.1 INTERACCIÓN GAS-SÓLIDO**

Si se expone un sólido humedecido con un líquido volátil a un ambiente gaseoso, relativamente seco, el líquido tenderá a abandonar al sólido y se difundirá en el gas. Esta operación, generalmente, se conoce como *secado* y cuando intervienen métodos de control termodinámico se denomina *deshidratación*.

En este caso la difusión se produce desde el sólido hacia la fase gaseosa, *desorción*. Si la difusión se produjera en dirección inversa estaríamos hablando de *adsorción*.

### **2.2.2 CLASIFICACIÓN GENERAL DE LA TRANSFERENCIA DE MASA**

El mecanismo de transferencia de masa depende de la dinámica del sistema en que se lo lleva a cabo. Regularmente existen dos tipos de transferencia de masa:

- Molecular,

---

<sup>12</sup> Robert E. Treyball, "Operaciones con Transferencia de Masa", Capítulo III, *Coefficientes de Transferencia de Masa*, Pág. 45.

- Convectiva.

#### *Transferencia de Masa – Molecular*

La masa puede transferirse por medio del movimiento molecular fortuito e individual de las moléculas del fluido, esto se da debido a una diferencia de concentraciones. Recordemos que la transferencia de masa se produce cuando existe transferencia de moléculas entre fases de diferente composición.

La difusión molecular puede ocurrir tanto en sistemas de fluidos móviles como inmóviles.

#### *Transferencia de Masa – Convectiva*

La masa puede transferirse debido al movimiento global del fluido. Puede ocurrir que el movimiento se efectúe en régimen laminar o turbulento. Se puede concluir que la baja velocidad del deshidratado de frutas y verduras es provocada por la naturaleza laminar de los fluidos de los alimentos, y la relación proporcional que tiene la velocidad de transferencia de masa con respecto al régimen del fluido.

Usualmente, ambos mecanismos actúan en forma conjunta. Sin embargo, uno puede ser cuantitativamente dominante. En estos casos Mendoza Cabral sugiere que solamente este último sea considerado en el análisis de un problema en particular. La transferencia de masa en sólidos porosos, líquidos y gases sigue el mismo principio descrito por la ley de Fick.

### **2.2.2.1 LEY DE FICK**

La difusión puede ser explicada gracias a un ejemplo tan sencillo como el siguiente: Al abrir un envase que contenga una sustancia olorosa, como un perfume, el espacio de aire más cercano a la boca del envase será invadido con el aroma del líquido; este fenómeno se llama *difusión*. Para que la difusión se presente es necesario que las distribuciones moleculares de las dos fases, en

este caso el líquido y el aire, no sean homogéneas, debe existir una diferencia o un gradiente de concentración entre dos puntos del medio.

La difusión tiende a devolver al sistema a su estado de equilibrio, de concentración constante.

Según Nestor Mendoza Cabral, la *Ley de Fick* establece que el flujo difusivo que atraviesa una superficie es directamente proporcional al gradiente de concentración (Ver Fig. 2.2). El coeficiente de proporcionalidad se llama *coeficiente de difusión* y es característico tanto para el soluto como para el medio en el que se disuelve.

Para un sistema discontinuo, membrana que separa dos cámaras, este coeficiente se escribe de la siguiente forma:

$$J = -D \times \frac{\Delta c}{\delta} \quad (2.11)$$

Donde:

- $J$ : es el flujo que atraviesa una superficie. ( $\text{mol} \times \text{cm}^{-2} \times \text{m} \text{ s}^{-1}$ )
- $D$ : es el coeficiente de difusión. ( $\text{cm}^2 \times \text{m} \text{ s}^{-1}$ )
- $\Delta c$ : es la diferencia de concentraciones molares. ( $\text{mol} / \text{cm}^3$ )
- $\delta$ : el espesor de la membrana. (micras)

“El signo negativo pone énfasis en la dirección de una gota de la concentración”<sup>13</sup>.

---

<sup>13</sup> Robert E. Treyball, “Operaciones con transferencia de masa”, Capítulo II, *Difusión molecular en fluidos*, Pág. 19.

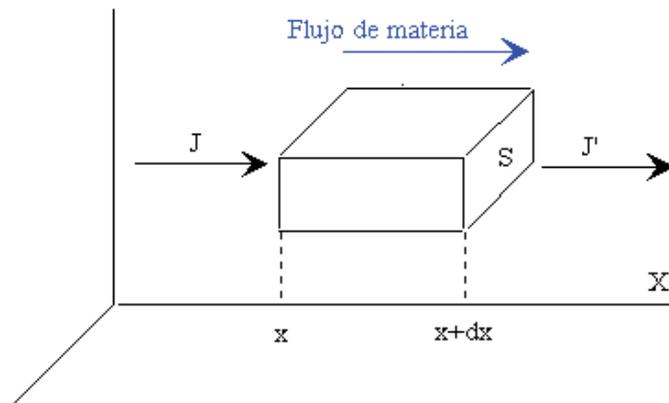


Fig. 2.2

*Ley de Fick-Flujo de materia*

La ley de Fick afirma que la densidad de corriente de partículas es proporcional al gradiente de concentración. J es el flujo inicial que atraviesa la superficie, J' es el flujo final que atraviesa la superficie, S es el objeto a través del cual fluye la materia, x es la distancia inicial a la que se da comienzo al flujo de materia y  $x+dx$  es la distancia final en donde la materia deja de fluir.

Fuente: Monografías.com. Aporte de Nestor Mendoza Cabral.

### 2.2.3 GENERALIDADES DEL TRANSPORTE DE MASA MOLECULAR

A la transferencia macroscópica de masa, independiente de cualquier convección que se lleve a cabo dentro de un sistema, se define con el nombre de difusión molecular u ordinaria<sup>14</sup>.

El transporte molecular es un resultado de la transferencia de moléculas individuales a través de un fluido, por medio de movimientos desordenados debido a su energía interna.

En los alimentos las moléculas se desplazan en líneas rectas con una velocidad uniforme. Sin embargo, al realizar un cambio brusco en la temperatura, las moléculas cambian su dirección al rebotar unas con otras moléculas después de

<sup>14</sup> Geankoplis, Christie J. "Procesos de transporte y operaciones unitarias", Capítulo 5.

haber chocado entre ellas. Entonces su velocidad sufrirá un cambio tanto en magnitud como en dirección. “A la difusión molecular a veces se le llama también proceso de camino desordenado”<sup>15</sup>.

El mecanismo real de transporte difiere en gran medida entre gases, líquidos y sólidos. Esta diferencia se debe a las variadas estructuras moleculares que se encuentran en los elementos correspondientes a cada estado.

## 2.2.4 ECUACIÓN GENERAL DEL TRANSPORTE MOLECULAR

La ecuación general del transporte molecular puede obtenerse a partir de un modelo gaseoso simple (teoría cinética de los gases). La ecuación resultante derivada de este modelo puede ser aplicada para describir los procesos de transporte molecular de cantidad de movimiento, calor y masa, de líquidos, sólidos y gases.

$$\psi_{neto} = \frac{1}{6l\bar{c}} \left( -\frac{dt}{dz} \right) \quad (2.12)$$

Donde:

- $\psi$  es la densidad del flujo (flujo por unidad de área, kmol/ s m<sup>2</sup>).
- $\bar{c}$  es la velocidad promedio de las moléculas de un gas (dependiente del tipo de gas).
- $l$  recorrido libre medio de las moléculas en minutos (dependiendo del medio en el que se encuentren las moléculas).
- $\frac{dt}{dz}$  incremento de la concentración en la dirección de z.

---

<sup>15</sup> Geankoplis, Christie J. “Procesos de transporte y operaciones unitarias”, Capítulo 5.

### 2.2.4.1 DETERMINACIÓN DE COEFICIENTES DE DIFUSIÓN

La difusividad o coeficiente de difusión  $D$  es una propiedad del sistema que depende, específicamente, de tres factores: temperatura, presión y naturaleza de los componentes.

*Ecuación Chapman-Enskog:*

$$D_{AB} = \frac{0.001858 \times T^{3/2} \left( \frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B} \right)^{1/2}}{P \times \sigma_{AB}^2 \times \Omega_D} \quad (2.13)$$

Donde:

- $D_{AB}$ : Difusividad de la masa A, que se difunde a través de B en  $\text{cm}^2$  /segundo.
- $T$ : Temperatura absoluta en grados Kelvin.
- $M_A, M_B$ : Pesos moleculares de A y B.
- $P$ : Presión absoluta en atmósferas.
- $\sigma_{AB}$ : Diámetro de colisión en Angstroms.
- $\Omega_D$ : Integral de colisión correspondiente a la difusión molecular.

En ausencia de datos experimentales, los valores de los componentes puros se pueden calcular de las siguientes relaciones empíricas:

$$\sigma = 1.18V_b^{1/3} \quad (2.14)$$

$$\sigma = 0.841V_c^{1/3} \quad (2.15)$$

$$\sigma = 2.44 \left( \frac{T_c}{P_c} \right)^{1/3} \quad (2.16)$$

Donde:

- $V_b$ : volumen molecular en el punto normal de ebullición ( $\text{cm}^3$ ).
- $V_c$ : volumen molecular crítico ( $\text{cm}^3$ ).
- $T_c$ : Temperatura crítica en grados Kelvin.
- $P_c$ : Presión crítica en atmósferas.

Para presiones superiores a 10 atmósferas esta ecuación ya no es apropiada y es necesario utilizar las gráficas obtenidas de la ley de los estados correspondientes.

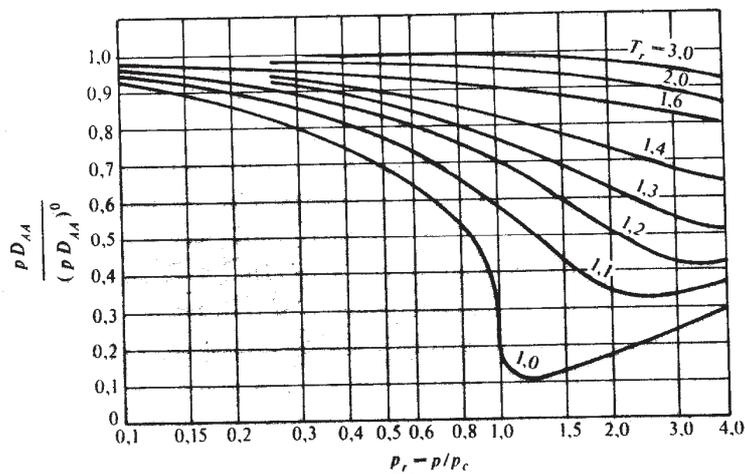


Fig. 2.3

*Relación generalizada de la difusividad en función de las presiones y temperaturas reducidas en procesos de autodifusión de gases a altas presiones.*

Fuente: Monografías. Com, Aporte de: Nestor Mendoza Cabral.

Mucha bibliografía sugiere que, en ausencia de datos experimentales, se debe recurrir al diagrama de la Fig. 2.3, para predecir  $D_{AB}$  utilizando propiedades pseudocríticas, pero se advierte que el procedimiento debe considerarse como *provisional*, ya que existen pocos datos experimentales para comprobarlo.

## 2.2.4.2 COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA DE MASA EN FLUJO LAMINAR

En un principio se puede considerar que no existe necesidad de coeficientes de transferencia de masa para el flujo laminar debido al predominio de la difusión molecular. Se pueden utilizar las relaciones vistas en el segmento anterior (ley de Fick, ecuación Chapman-Enskog, etc.) para calcular los regímenes de transferencia de masa.

Sin embargo, también se recomienda que se trabaje con un método regular y uniforme tanto para flujos turbulentos como laminares.

“Los coeficientes de transferencia de masa para el flujo laminar deben ser de posible cálculo”<sup>16</sup>. Treyball asegura que esto es posible, siempre y cuando las condiciones del flujo puedan ser descritas y las fórmulas matemáticas resulten, en general, útiles.

A pesar de estas consideraciones, es necesario mencionar al Número de Sherwood y al Número de Schmidt.

*Número de Schmidt:*

$$Sc = \frac{\mu}{\rho D_{AB}} = \frac{\nu}{D_{AB}} \quad (2.16)$$

Donde:

- $\rho$  : densidad (Kg/m<sup>3</sup>).
- $\mu$  : viscosidad absoluta (s/m<sup>2</sup>).

---

<sup>16</sup> Robert. E Treyball, “Operaciones con transferencia de masa”, Capítulo III, *Coefficientes de transferencia de masa en flujo laminar*. Pág. 48.

- $\nu$  : viscosidad cinemática (m<sup>2</sup>/s).
- $D_{AB}$ : Coeficiente de difusión (m<sup>2</sup>/s).

El número de Schmidt representa la relación adimensional de dos difusividades

*Número de Sherwood:*

$$Sh_{med} = \frac{k_{L,med} x}{D_{AB}} = 0.664 Re_x^{1/2} Sc^{1/2} \quad (2.17)$$

Donde:

- $k$  : conductividad térmica Conductividad térmica (W/m•K).
- $L_{med} x$  : Longitud - distancia media  $x$  (m).
- $D_{AB}$ : Coeficiente de difusión (m<sup>2</sup>/s).

El coeficiente de transferencia de masa media del borde principal del sólido húmedo a la distancia  $x$ , se puede obtener por medio del número de Sherwood, número que puede calcularse utilizando los números de Reynolds y Schmidt que han sido revisados anteriormente.

Robert E. Treybal en su obra "Operaciones con transferencia de masa" establece la siguiente ecuación para obtener el valor de  $K_L$ .

$$K_L = \frac{Sh_{med} \times D_{AB}}{med x} \quad (2.18)$$

### 2.2.4.3 EQUILIBRIO EN LA TRANSFERENCIA DE MASA

La transferencia de masa entre fases es de especial interés para las industrias bioquímica y de alimentos. "Las fases pueden ser sólidas, líquidas o gaseosas

y en cualquier operación de transferencia de masa pueden hallarse implicadas dos o más”<sup>17</sup>.

Cuando una fase consta de varios componentes, es frecuente encontrar diferencias en su tendencia a la transferencia hacia otra, u otras fases.

La deshidratación es una operación de separación; este tipo de procesos se llevan a cabo en una sola o en múltiples etapas o contactos. Brennan menciona que una de las etapas es la unidad del equipo, en la que se establece el contacto entre dos o más fases; en el caso del deshidratador de túnel contracorriente, la etapa de contacto es el túnel “per se” (considerando a las bandejas de transporte como despreciables). Este contacto se mantiene durante un tiempo predeterminado; una vez cumplido este tiempo, se produce la separación mecánica de las fases.

Durante el contacto se produce la transferencia de masa de los componentes de las fases, aproximándose progresivamente al estado de equilibrio.

El *equilibrio*, ya sea ideal o teórico, de una etapa cualquiera supone que las fases han sido mezcladas por completo, y han permanecido en contacto el tiempo suficiente como para alcanzar un equilibrio termodinámico entre ellas, antes de proseguir con el proceso de separación.

En una etapa considerada como *real*, no se alcanza un equilibrio auténtico y el cambio de composición es menor al considerado teóricamente.

La *eficacia de la etapa* se puede definir como el cociente obtenido de la división del cambio en la composición por el cambio que debería haber tenido lugar en una situación de equilibrio, bajo condiciones idénticas (cambio experimental sobre cambio teórico).

---

<sup>17</sup> J.G. Brennan, “Las operaciones de la ingeniería de alimentos”, Capítulo 8, *Extracción sólido-líquido y estrujamiento*. Pág. 205.

### 2.2.4.4 SISTEMAS DE TRANSFERENCIA DE MASA EN CONTRACORRIENTE

Los sistemas de transferencia de masa en contracorriente, de múltiples etapas, se utilizan como un procedimiento alternativo para obtener una máxima separación de los componentes; en el caso del secado de los alimentos se lo utiliza para retirar la mayor cantidad posible de agua de los mismos y prolongar, en mayor cantidad, la vida útil del alimento.

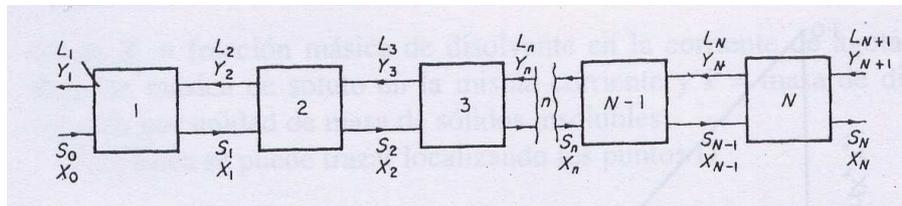


Fig. 2.4

*Sistema de transferencia de masa en contracorriente, de múltiples contactos.*  
 En el diagrama, N es la última unidad del sistema; n cualquiera de ellas.

Fuente: "Operaciones con Transferencia de masa", Robert E. Treyball.

La Fig. 2.4 nos permite observar un sistema en contracorriente de etapas múltiples. En capítulos posteriores se podrá comparar este diagrama con el esquema de un túnel contracorriente. En esta figura las dos fases entran por los extremos opuestos de una serie de unidades de secado, y fluyen a lo largo de la misma en sentido opuesto (contracorriente).

El proceso de secado y las composiciones en cada etapa del túnel contracorriente serán explicados en el capítulo correspondiente. Por el momento se estudiarán únicamente algunas de las ecuaciones que se utilizan para determinar los balances de masa y flujo neto.

*Balance de masa total:*

$$S_0 + L_{N+1} = S_N + L_1 = \mathcal{E} \quad (2.19)$$

Donde:

- $\varepsilon$  es la masa total de la mezcla del sistema.

*Balance másico de un componente:*

$$S_0 X_0 + L_{N+1} Y_{N+1} = S_N X_N + L_1 Y_1 = \varepsilon Z_\varepsilon \quad (2.20)$$

Donde:

- $Z_\varepsilon$  es la composición media (fracción másica) de un componente de la mezcla, en la serie.
- $S$ , es el solvente (Fase A).
- $L$ , es el soluto (Fase B)
- $X$  y  $Y$ , representan las concentraciones de las fases A y B respectivamente.

**Flujo neto:**

El flujo neto es la diferencia de velocidad entre el flujo másico entre las dos corrientes que se establecen en un sistema contracorriente.

“El concepto de flujo neto puede aplicarse al flujo de masa total o al de uno o más componentes de los flujos contracorriente”<sup>18</sup>.

*Flujo neto total:*

$$\Delta = S_0 - L_1 = S_n - L_{n+1} = S_N - L_{N+1} \quad (2.21)$$

*Flujo neto de un componente:*

$$X\Delta = S_0 X_0 - L_1 Y_1 = S_n X_n - L_{n+1} Y_{n+1} = S_N X_N - L_{N+1} Y_{N+1} \quad (2.22)$$

---

<sup>18</sup> J.G. Brennan, “Las operaciones de la ingeniería de alimentos”, Capítulo 8, *Extracción de sólido-líquido y estrujamiento*, Pág. 211.

## 2.3 ANALOGÍAS ENTRE LAS TRANSFERENCIAS DE MASA Y CALOR

A continuación se presenta un resumen de las analogías que se pueden encontrar entre las transferencias de masa y calor.

- Los coeficientes de transferencia de calor y masa están dados por las mismas funciones; recordemos que al principio de la sección 2.2.1 se aclaró que las ecuaciones para la transferencia de calor y masa deben ser similares.

Tabla 2.1

**Analogías entre transferencia de masa y calor**

No.	Transferencia de Masa	Transferencia de Calor
1	$\frac{c_A - c_{A1}}{c_{A2} - c_{A1}}$ <p>C=concentración.</p>	$\frac{t - t_1}{t_2 - t_1}$ <p>t=temperatura.</p>
2	<p><b>Número de Reynolds</b></p> $Re = \frac{\rho \times V \times D}{\mu}$ <p><math>\rho</math> =densidad;  <math>\mu</math> =viscosidad absoluta;  V=velocidad del fluido;  D=longitud característica.</p>	<p><b>Número de Reynolds</b></p> $Re = \frac{\rho \times V \times D}{\mu}$ <p><math>\rho</math> =densidad;  <math>\mu</math> =viscosidad absoluta;  V=velocidad del fluido;  D=longitud característica.</p>
3	<p><b>Número de Schmidt</b></p> $Sc = \frac{\mu}{\rho D_{AB}} = \frac{\nu}{D_{AB}}$ <p><math>\rho</math> =densidad,  <math>\mu</math> =viscosidad absoluta,  <math>\nu</math> =viscosidad cinemática,  D=difusividad molecular.</p>	<p><b>Número de Prandtl</b></p> $Pr = \frac{\mu Cp}{k} = \frac{\nu}{\alpha}$ <p><math>\mu</math> =viscosidad absoluta,  Cp =calor específico,  k =conductividad térmica,  <math>\nu</math> =viscosidad cinemática,  <math>\alpha</math> =difusividad térmica.</p>

<b>4</b>	<p><b>Número de Sherwood</b></p> $Sh_{med} = \frac{k_{L,med} \cdot x}{D_{AB}}$ <p><math>k</math> =conductividad térmica  <math>l</math>=longitud,  <math>_{med} x</math> =distancia media <math>x</math>,  <math>D_{AB}</math>=difusividad molecular.</p>	<p><b>Número de Nusselt</b></p> $Nu = \frac{h \times lc}{k}$ <p><math>h</math>=coeficiente de transferencia de calor,  <math>l</math>=longitud característica,  <math>k</math>=conductividad térmica.</p>
----------	---	---

En la tabla 2.1 se pueden observar algunas de las ecuaciones de transferencia de masa en comparación con las de transferencia de calor vistas en la sección 2.1.3.1. A pesar de que en la transferencia de masa para flujo laminar no se necesitan coeficientes de transferencia, se puede observar que los componentes de cada ecuación son similares entre sí.

Treyball establece que para que estas analogías sean válidas las limitaciones deben ser las siguientes:

- a. Las condiciones de flujo y las formas geométricas deben ser las mismas.
- b. La mayor parte de los datos de transferencia de calor están basados en situaciones que no implican transferencia de masa. El uso de la analogía daría coeficientes de masa correspondientes a una transferencia de masa no neta.
- c. Las condiciones límite a utilizar para resolver las correspondientes ecuaciones diferenciales deben ser análogas
- d. Los factores de fricción y los perfiles de velocidad deben correlacionarse con las correspondientes cantidades de calor y de transferencia de masa. Tanto para flujo laminar como para flujo turbulento, los factores de fricción deben indicar fricción superficial y no resistencia de forma.

## 2.4 TRANSFERENCIA SIMULTÁNEA DE CALOR Y MASA.

La transferencia de masa puede ocurrir simultáneamente con la transferencia de calor, ya sea como resultado de la imposición de una diferencia de temperatura externa, o por la absorción de calor que ocurre generalmente cuando se transfiere una sustancia de una fase a otra<sup>19</sup>.

Cuando se presentan estos casos de transferencia simultánea, dentro de una fase, el calor que se ha transferido es un resultado no solo de la convección sino también del calor sensible arrastrado por la materia que se difunde.

Como resultado de la diferencia de temperatura, existe la presencia de un flujo calórico por el coeficiente ordinario de transferencia de calor  $h$  en ausencia de transferencia de masa.

---

<sup>19</sup> Robert. E. Treyball, "Operaciones de transferencia de masa", Capítulo III, *Coefficientes de transferencia de masa*, Pág. 79.

# 3

## SECADO DE FRUTAS Y VERDURAS

Las frutas y verduras sufren cambios, a veces drásticos, durante el proceso de secado; estos cambios suelen darse en correspondencia con las propiedades geométricas del alimento, su humedad específica, tratamientos previos, entre otros. El diseño básico del Deshidratador de Túnel Contracorriente, está orientado hacia el secado de naranjas y pimientos verdes; es por esto que se presentarán datos específicos de las propiedades de estos alimentos, así como un análisis sobre los factores que afectan a las frutas y verduras durante su proceso de deshidratación.

### 3.1 PROPIEDADES GENERALES DE LOS ALIMENTOS.

J.G Brennan, sostiene que los alimentos son portadores de diversos tipos de propiedades, entre los que se encuentran los siguientes:

*Propiedades geométricas:* forma, uniformidad, ausencia de irregularidades, tamaño, peso.

*Propiedades físicas:* color, textura, características aero e hidrodinámicas, propiedades friccionales y de superficie.

*Propiedades funcionales:* resistencia a la tensión, flavor, aptitud para el procesado.

*Características relacionadas con el grado de desarrollo:* etapa de desarrollo y grado de madurez<sup>20</sup>.

---

<sup>20</sup> J.G Brennan, "Las operaciones en la ingeniería de alimentos", Capítulo 1, *Las operaciones de la ingeniería de los alimentos*, Pág. 4.

En esta sección serán estudiadas sucintamente las propiedades geométricas y físicas.

### **3.1.1 PROPIEDADES GEOMÉTRICAS**

Las propiedades geométricas son un factor muy importante para determinar la duración del proceso de secado. Dependiendo de estas se puede definir el tipo y duración del tratamiento previo y el tiempo que el alimento tendrá que permanecer dentro del túnel.

Las características generales que se valoran en los alimentos que serán expuestos a algún tipo de método de conservación o procesado son las siguientes:

- forma,
- uniformidad,
- irregularidades superficiales,
- tamaño y peso.

Las dimensiones de un alimento son esenciales para determinar los procesos térmicos que buscan la prolongación de su vida útil. Sin embargo, en la naturaleza es imposible encontrar frutas o verduras que sean idénticas entre ellas. En este punto, la estadística juega un papel esencial.

La *uniformidad* es, en especial, importante para el llenado de envases, los procesos térmicos, la deshidratación, entre otros.

Es difícil encontrar alimentos que respondan a una uniformidad perfecta, es decir, manzanas o naranjas perfectamente redondas, de diámetros exactos e iguales entre sí.

Debido a este impedimento, se debe encontrar formas para solventar estos problemas. Métodos tales como la toma de medidas con un calibrador de un grupo de frutas del mismo género y el posterior uso de herramientas de muestreo para determinar el promedio de medición, facilitan la tarea de dimensionar productos al granel y encontrar una media de uniformidad.

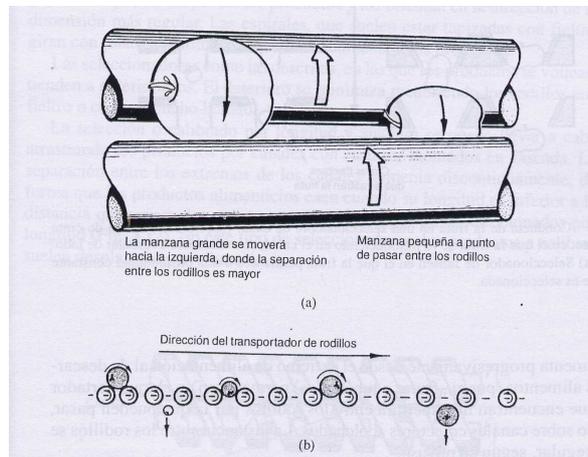
Las *irregularidades superficiales* en las frutas y verduras representan un problema no solo en la estética del alimento, sino también en la limpieza y operaciones de procesado. En el proceso de secado no se consideran como determinantes, sin embargo, por efectos de estética y espacio en las vagonetas transportadoras, las irregularidades deben ser, en lo posible, eliminadas.

Lo ideal en estos casos es la selección de alimentos sin irregularidades significativas o con irregularidades pequeñas que sean fáciles de eliminar. El procesar alimentos con irregularidades no solo implica riesgos en la limpieza, sino que también incrementa de manera significativa la mano de obra utilizada en el proceso y, por lo tanto, costos de producción.

Otro caso en el cual se deben tomar medidas manuales o mecánicas es la determinación del *tamaño* o *peso* de las frutas y verduras. El método más mencionado y recomendado para la determinación del tamaño del alimento es la utilización de un calibrador (pie de rey). Por otro lado, el peso de la fruta o verdura puede ser obtenida gracias a balanzas automáticas o manuales.

Un método alternativo, aunque costoso, para la medición del tamaño es el sistema de rodillos, los cuales se separan el uno del otro, en ejes paralelos, a

una distancia equivalente a la medida deseada para la fruta o verdura. Este sistema se explica de mejor manera en la Fig. 3.1



*Método de selección de tamaño por rodillos.*

Fuente: "Introducción a la Ingeniería de los Alimentos", Singh-Heldman

Al igual que en el caso de las irregularidades superficiales, el exceso (o defecto) de tamaño o peso conllevan incrementos en los costos de producción y consecuente eliminación de producto inservible, el cual no siempre puede ser reutilizado.

## 3.1.2 PROPIEDADES FÍSICAS

### 3.1.2.1 COLOR

El proceso de deshidratación, al ser una operación que utiliza aire caliente, produce cambios bruscos en la coloración del alimento; decoloración, pardeamiento, tonalidades rosáceas, son algunos de los cambios que se pueden presentar, y se deben esperar, en el secado de alimentos. Si la imagen del

producto final es uno de los factores más importantes en la comercialización del mismo, se recomienda aplicar tratamientos térmicos, tales como el escaldado e incluso la utilización de colorantes naturales o permitidos para homogenizar esta propiedad.

### **3.1.2.2 TEXTURA**

Generalmente la *textura* es un factor considerado dentro de las especificaciones de calidad de los productos. Para mantener la *textura* es necesario utilizar materias primas que resistan el esfuerzo mecánico de los pretratamientos o del proceso en sí.

Las características de la *textura* se determinan por medio de pruebas sensoriales aplicadas a catadores profesionales, o por medio de ensayos instrumentales.

El determinar la *textura* de la materia prima permite predecir su comportamiento durante el procesado.

También se puede buscar un cambio específico en la *textura* como elemento organoléptico y los procesos deben ser controlados para obtenerlo.

### **3.1.2.3 AERO E HIDRODINÁMICA**

Se entienden como propiedades aerodinámicas todas aquellas características particulares del aire de secado (color, pureza, temperatura, humedad, etc) y como propiedades hidrodinámicas todos los tipos de enlaces moleculares presentes en el agua.

En el proceso de secado es necesario establecer las propiedades *aero e hidrodinámicas* debido a que el aire y el agua son utilizados para el transporte molecular de masa y calor. Son estas propiedades las que determinarán el comportamiento termodinámico y mecánico de los alimentos durante el proceso de secado. El flujo de fluido interno de las frutas y verduras también son delineados por estas propiedades.

#### **3.1.2.4 PROPIEDADES FRICCIONALES**

Al mencionar propiedades friccionales, se hace referencia a la cantidad de rozamiento que puede estar presente entre el aire de secado y el medio circundante.

Básicamente, las propiedades friccionales en el proceso de secado utilizando un Deshidratador de Túnel Contracorriente, son tomadas en cuenta en el proceso de carga y descarga de las vagonetas. Menor fricción en el alimento, mayor velocidad de descarga o acomodamiento en bandejas.

Sin embargo, esto tiene mayor aplicación si el llenado es continuo y automatizado.

#### **3.1.2.5 SUPERFICIE ESPECÍFICA**

En la deshidratación de frutas y verduras la superficie de los alimentos influye en el transporte molecular del fluido contenido en el sólido hacia el gas de secado. Las áreas superficiales del alimento pueden ser dimensionadas por pelado y medición con planímetro. Además, son determinadas experimentalmente y

tabuladas en fuentes bibliográficas en función del tipo de corte o troceado del alimento

### **3.2 DESHIDRATACIÓN DE LA NARANJA Y EL PIMIENTO.**

El Deshidratador de Túnel en Contracorriente será diseñado específicamente para el secado de Naranjas y Pimientos rojos. Estos alimentos han sido escogidos debido a sus rasgos y características específicas, las cuales serán delineadas a continuación.

#### **3.2.1 NARANJA**

##### **3.2.1.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA NARANJA**

En la siguiente Tabla se presentan las características consideradas como más relevantes de la naranja:

Tabla 3.1 <b>CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LA NARANJA</b>	
Humedad Específica:	90-95% CDA
Temperatura Óptima de almacenado (naranja sin procesar):	3-8°C (38-46°F)
Origen Climático:	Subtropical
Diámetro promedio:	5 - 7,3 +- 0,4 centímetros.
Masa Promedio:	138 +- 25 gramos.

Las naranjas que se seleccionan para ser deshidratadas deben estar secas y limpias, sin pedúnculo, sin rasgaduras, no deben estar sobre maduras, no deben tener más de 48 horas de cosechadas, su color debe ser amarillo-anaranjado, estar libres de pesticidas u otros productos químicos.

### 3.2.1.2 CINÉTICA DE SECADO DE LA NARANJA

Existe una fórmula elemental para el cálculo de la deshidratación de naranjas. Previo al proceso, las naranjas deben ser pesadas y calibradas; así se obtiene el promedio de dimensiones una vez secada la fruta.

$$Deshidratación = \frac{Peso_{inicial} - Peso_{final}}{Superficie} \quad (3.2)$$

La transferencia de masa juega un papel esencial en los procesos de deshidratación de alimentos. En este tipo de procesos, la resistencia a la transferencia de masa, el flujo y la transferencia de calor pueden ser factores limitantes. La difusión molecular dentro de sólidos puede ser cuantificada por medio de la ley de Fick. Sin embargo, este trabajo se dificulta debido a las irregularidades de la fruta y la falta de homogeneidad en su composición. “El diseño eficiente y la operación de los procesos de transferencia de masa requieren datos confiables sobre las propiedades de la transferencia de los alimentos”<sup>21</sup>. No obstante, muchos de estos datos no pueden ser obtenidos experimentalmente, es en estos casos donde se debe recurrir a la información bibliográfica disponible o a los coeficientes asumidos en casos de deshidratación similares.

Un estudio realizado por el Centro de Investigaciones Químicas de la Universidad Autónoma de Hidalgo determinó que el bagazo de naranja, es decir la parte interna de la fruta una vez que el jugo ha sido extraído y la piel eliminada, se deshidrata a temperaturas que oscilan entre 60 y 80°C, hasta llegar a una humedad final donde no se observan cambios aparentes. En este

---

<sup>21</sup> Estudiantes del Centro de Investigaciones Químicas de la Universidad Autónoma de Hidalgo-México. *Cinética de Secado del Bagazo de Naranja en Función de la Temperatura con Aire Forzado*.

estudio la cinética de secado se puede observar en forma exponencial, es decir que conforme existe un incremento en el tiempo de secado, la humedad de la fruta será removida en forma exponencial.

Sin embargo esta información será considerada únicamente como referencial ya que, a pesar de existir similitudes, el resultado de la deshidratación de bagazo de naranja y rodajas de naranja presenta variaciones.

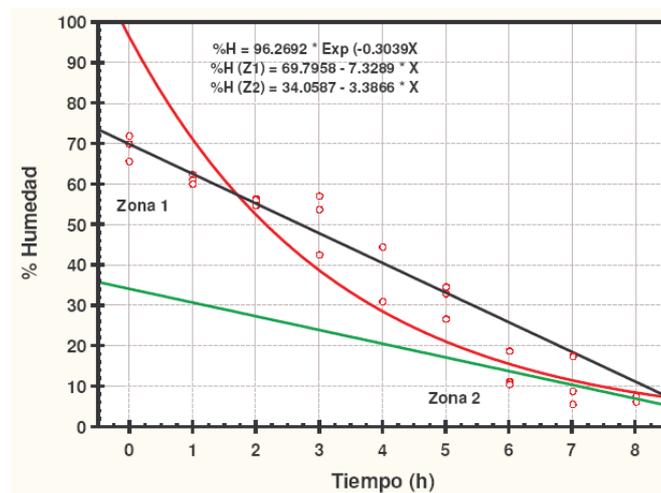


Fig. 3.2

Cinética de Secado del Bagazo de Naranja determinado a 60°C

Fuente: "Cinética de Secado del Bagazo de Naranja en Función de la Temperatura con Aire Forzado", Centro de Investigaciones Químicas de la Universidad Autónoma de Hidalgo.

En la Fig. 3.2 se puede observar la relación exponencial entre el tiempo y la humedad en la cinética de secado el Bagazo de Naranja. Al mencionar la palabra *exponencial*, se hace referencia a una relación en la que, mientras el tiempo de deshidratación sea mayor, la humedad encontrada en el alimento será menor en una proporción correspondiente a un exponente determinado.

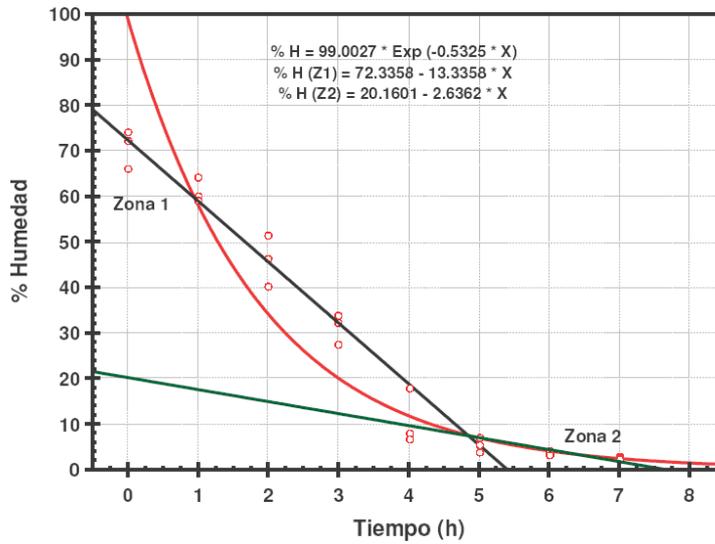


Fig. 3.3

*Cinética de Secado del Bagazo de Naranja determinado a 80°C*

Fuente: “Cinética de Secado del Bagazo de Naranja en Función de la Temperatura con Aire Forzado”, Centro de Investigaciones Químicas de la Universidad Autónoma de Hidalgo.

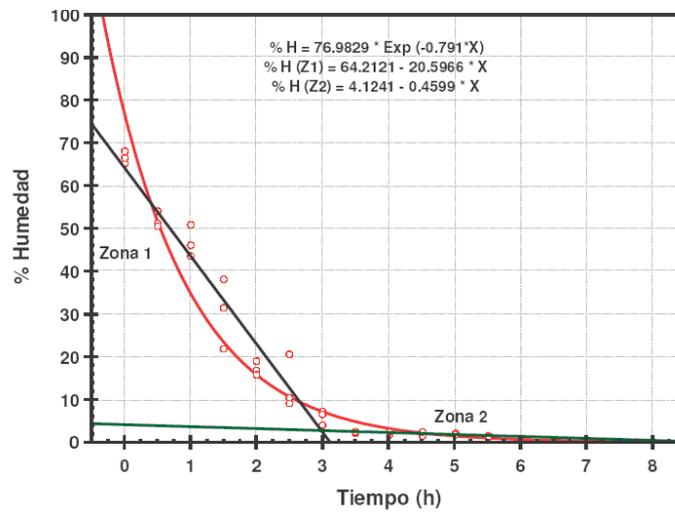


Fig. 3.4

*Cinética de Secado del Bagazo de Naranja determinado a 70°C*

Fuente: “Cinética de Secado del Bagazo de Naranja en Función de la Temperatura con Aire Forzado”, Centro de Investigaciones Químicas de la Universidad Autónoma de Hidalgo.

Las Fig. 3.3 y 3.4 presentan las mismas cinéticas de secado a temperaturas de 70 80°C, el cambio más notorio entre ellas es la velocidad de secado en relación con la disminución de la humedad, es decir que, mientras la temperatura de deshidratación sea mayor, menor va a ser el tiempo requerido para que disminuya la humedad.

Los datos experimentales que fueron obtenidos en el estudio de la Universidad Autónoma de Hidalgo, demuestran que la humedad final obtenida después del proceso de deshidratación era menor, conforme a la temperatura utilizada en el secado: mientras más alta sea la temperatura utilizada, menor es la humedad final en el alimento.

Tabla 3.2			
<b>DATOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS POR LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE HIDALGO</b>			
	<b>60 °C</b>	<b>70 °C</b>	<b>80 °C</b>
Humedad final obtenida	6,82%	2,59%	1,41%

Fuente: "Cinética de Secado del Bagazo de Naranja en Función de la Temperatura con Aire Forzado", Centro de Investigaciones Químicas de la Universidad Autónoma de Hidalgo.

En la Tabla. 3.2 se puede observar la gran variación que existe entre porcentajes de humedad final de la naranja respecto a la temperatura de deshidratación. A 80 °C se puede obtener una eliminación casi total del líquido; un porcentaje de 10% de humedad remanente en el alimento se puede considerar como nivel óptimo de deshidratación, ya que este es un valor de agua suficiente como para que la naranja se conserve, mantenga sus nutrientes y pueda ser rehidratada eficientemente.

A pesar de que este aumento de temperatura representa un ahorro sustancial de tiempo, se puede correr el riesgo de que el alimento se cocine, pierda más nutrientes de los esperados y su calidad sea deficiente. Por lo tanto, se recomienda un estudio termodinámico profundo, en el cual se determinen

temperaturas de trabajo y humedades finales óptimas para la obtención de un producto de calidad.

### **3.2.2 PIMIENTO**

#### **3.2.2.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL PIMIENTO**

La siguiente Tabla presenta las características principales del pimiento:

Humedad Específica:	85-90% CDA
Humedad relativa del aire de almacenado (pimiento sin procesar)	70 – 80%
Origen Climático:	Cálido – Frío.
Diámetro promedio:	5 - 9 centímetros.
Peso Promedio:	7 - 10 gramos.

Los pimientos son considerados como vegetales ideales para la deshidratación por aire caliente; esto se debe a su alta resistencia a las alteraciones producidas por el calor.

#### **3.2.2.2 CINÉTICA DE SECADO DEL PIMIENTO**

Al deshidratar vegetales utilizando altas temperaturas se pierden una gran parte de sus propiedades organolépticas y valor nutricional.

En el modelado de la cinética de secado de pimiento, desarrollado por A. Vega en la Universidad de Selena-Chile, se consideran cuatro temperaturas

experimentales: 50, 60, 70 y 80 °C, y se mantiene la humedad relativa del aire al 55%<sup>22</sup>.

En el estudio realizado se plantea que en el pimiento se presentan tres etapas; la primera es un corto y rápido periodo introductorio, la segunda es una etapa en donde la velocidad de secado es proporcional con la humedad libre del vegetal, hasta que alcanza un valor crítico de humedad de más o menos 1g agua/ g materia seca, y la tercera corresponde a una disminución de la velocidad de deshidratación, en la que el mecanismo que se encarga de la salida de agua del pimiento es la difusión molecular; esta tercera etapa avanza hasta llegar a la humedad de equilibrio.

Básicamente, el proceso de modelado de la cinética de secado del pimiento tiene características similares al de la naranja; esto se debe a que sus humedades relativas difieren en apenas un 5 – 10%. Al ser el pimiento un sólido húmedo con mayor contenido de agua que la naranja, el tiempo de exposición al aire caliente debe ser mayor.

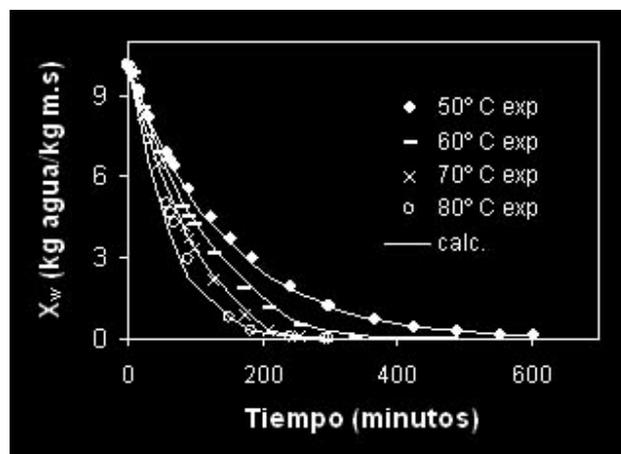


Fig. 3.5

*Curvas de velocidad de secado del pimiento para las cuatro temperaturas utilizadas (50, 60, 70, 80 °C) y separación funcional de las etapas de secado observadas*

Fuente: "Cinética de Secado del Pimiento". A. Vega, Universidad de Selena-Chile.

<sup>22</sup> A. Vega, Universidad de Selena – Chile, Departamento de Ingeniería de Alimentos, *Modelado de la Cinética de Secado de Pimiento Rojo*.

Como se puede observar en la Fig. 3.5, la velocidad de secado incrementa según la temperatura del aire caliente. Al exponer al pimiento a un ambiente de 80°C se logra reducir el tiempo de deshidratación en casi 400 minutos, lo que representa una disminución aproximada del 66.6%, en relación con el contenido de agua inicial. Sin embargo, sujetar al pimiento a temperaturas muy extremas puede traer complicaciones: el alimento puede cocerse, quemarse, perder sus propiedades organolépticas y nutritivas, entre otros. Los valores resultantes del proceso de deshidratación de pimiento pueden ser obtenidos únicamente de forma experimental, ya que las condiciones de secado varían conforme al proceso y a la presión a la que esté sujeto el pimiento.

La ley de Fick es fundamental para modelar la cinética de secado de cualquier alimento; es con esta ley que se pueden realizar los cálculos que permitirán determinar las prestaciones y requerimientos del deshidratador.

### **3.2.3 INFLUENCIA DE LA GEOMETRÍA DE CORTE**

La geometría de corte del alimento también tiene notable influencia en los tiempos de secado tanto de la naranja como del pimiento. La siguiente Tabla corresponde a los parámetros de secado de la berenjena, vegetal que tiene características similares, en términos de contenido de agua, a las del pimiento y la naranja.

Tabla. 3.4

**Influencia de la geometría de corte en el Porcentaje final de concentración de diámetro y espesor en la deshidratación de Berenjenas.**

T	Diámetro (cm)	Espesor (cm)	Xbsalabeado (g de Agua / g. sólido seco)	ds	%Contracción diámetro	ds	%Contracción espesor	ds
50°C	6-7	0.6-0.8	5.29	1.01	12.06	2.74	27.68	6.92
		1.2-1.4	2.16	0.31	21.57	2.75	37.97	1.85
	7-8	0.6-0.8	5.53	1.30	16.69	2.24	27.35	5.21
		1.2-1.4	2.064	0.19	21.31	0.11	32.64	4.00
70°C	6-7	0.6-0.8	5.56	0.76	22.19	2.70	28.67	4.91
		1.2-1.4	4.56	0.97	19.80	0.97	35.53	4.79
	7-8	0.6-0.8	5.265	1.39	20.86	6.06	33.73	8.50
		1.2-1.4	5.03	0.86	17.17	0.69	41.40	1.27
90°C	6-7	0.6-0.8	3.95	0.72	15.49	1.90	31.62	4.33
		1.2-1.4	1.75	0.26	18.07	0.73	50.14	3.3
	7-8	0.6-0.8	4.19	0.40	15.82	1.34	25.9	0.99
		1.2-1.4	3.11	0.32	18.74	0.53	49.2	2.5

Fuente: "Cinética del Secado de Berenjenas", Chávez C.G., Sgroppo S.C., Avanza J.R.

En el Cuadro es posible observar cómo cambian los diámetros y espesores de la berenjena una vez finalizado el proceso de secado y cómo este cambio se da como consecuencia de las dimensiones iniciales del corte.

### 3.2.4 TRATAMIENTOS PREVIOS PARA SECADO

El objetivo primordial de estos tratamientos es aplicar calor con el fin de evitar modificaciones químicas en el alimento. Esto permitirá asegurar algunas de las propiedades de las frutas y verduras.

Entre los tratamientos térmicos se puede enumerar al escaldado, horneado u horneo, cocción por extrusión, cocción en agua, fritura, asado, etc. En esta sección se estudiará únicamente al escaldado que es el procesamiento previo ideal para continuar con la deshidratación.

### 3.2.4.1 ESCALDADO

Este es el principal tratamiento térmico que se tomará en cuenta al realizar el secado de frutas y verduras.

El objetivo principal del *escaldado* es inactivar las enzimas de los alimentos, lo cual es un aporte para la extensión de la vida útil del deshidratado; ya que sin estas enzimas la duración del alimento se incrementa considerablemente.

El escaldado consiste en calentar rápidamente al alimento, evitando el punto de cocción, hasta una temperatura previamente fijada (70 °C – 80 °C) y durante un tiempo determinado (20 segundos); posterior al calentamiento se debe enfriar rápidamente al alimento (shock térmico).

Al realizar el proceso de deshidratación habiendo omitido el tratamiento de escaldado, el alimento requerirá de más tiempo o mayor temperatura de secado hasta llegar al punto de inactivación de las enzimas, lo cual se traduce en un aumento de costos de operación, mayor tiempo de proceso, mayor consumo energético, además de alteraciones físicas como oxidación y cambios de color.

A continuación se enumeran otros efectos que tiene el proceso de escaldado:

- Mejora la textura, esta característica es más representativa en el proceso de deshidratación de alimentos,
- Limpieza del alimento y reducción de la actividad microbiana.

A pesar de los beneficios que trae el escaldado, también se puede nombrar algunos efectos negativos de este proceso como lo es la pérdida de vitaminas sensibles al calor (que incluso sin realizar el escaldado se perderían en el secado), y de nutrientes solubles en agua.

Existen dos tipos de escaldado:

- Escaldado por inmersión en agua caliente,
- Escaldado al vapor.

### **3.2.5 REHIDRATABILIDAD**

Dependiendo del uso final del producto deshidratado, uno de los parámetros más importantes que deben ser considerados en la deshidratación de alimentos es la *rehidratabilidad* de los mismos, una vez que han sido sometidos al proceso de secado.

Al hablar de rehidratabilidad se hace referencia a la capacidad que tiene el alimento desecado para absorber agua y, de alguna manera, reestablecer las propiedades que lo caracterizaban en un principio.

Brennan indica que: “La velocidad con que se reconstituyen las hortalizas deshidratadas por aire puede depender de la velocidad inicial de secado”<sup>23</sup>.

Existen factores importantes como: mientras menor sea la humedad final del alimento, mayor será la dificultad que este tenga para rehidratarse correctamente. Si durante el proceso de deshidratación se ha producido un daño excesivo del producto, la rehidratabilidad también se encuentra comprometida.

### **3.2.6 VIDA ÚTIL DEL PRODUCTO FINAL**

El contenido de humedad final del producto, después de ser sometido al proceso de deshidratación, será el determinante de la vida útil del mismo. Mientras

---

<sup>23</sup> J.G. Brennan, Las operaciones de la ingeniería de alimentos, Capítulo 13, *Deshidratación*, Pág. 419.

menor sea la cantidad de humedad restante en el alimento, mayor será su vida útil; sin embargo, el exceso de deshidratación de alimentos conlleva problemas tales como la falta de rehidratabilidad. Es imposible considerar la existencia de un alimento cuya vida útil sea infinita.

Una de las características principales de los alimentos deshidratados es la larga vida útil relativa. La definición de la estabilidad de los alimentos es esencial ya que es este un parámetro determinante para el valor comercial del producto final y la utilidad del mismo. La cantidad de humedad puede ser valorada por la actividad de agua ( $A_w$ ); los valores óptimos para incrementar la vida útil del alimento son on:  $A_w < 0,6$ .

# 4

## DISEÑO PRELIMINAR

El propósito de este Capítulo será plantear los requerimientos iniciales que definirán al prototipo de Deshidratador de Túnel Contracorriente. Al ser este un Diseño Preliminar, estará sujeto a modificaciones, las cuales serán señaladas a lo largo de los capítulos subsiguientes; sin embargo, se mantendrán, en lo posible, la mayor cantidad de parámetros definidos en esta sección.

### 4.1 DESCRIPCIÓN DE SECCIONES Y COMPONENTES

En el Anexo 1.1 se puede observar información básica y la ubicación de cada sección y componente del prototipo. Se debe considerar que este es un bosquejo sencillo cuya intención es la de señalar esquemáticamente cuál es la estructura de la máquina; por lo tanto, no se puede considerar como un diagrama descriptivo y mucho menos definitivo de cómo se verá este proyecto una vez construido.

El prototipo del Túnel Contracorriente estará compuesto por 4 secciones principales que son:

- Descarga de Flujo,
- Calentador,
- Distribución y Deflexión,
- Túnel de Secado.

Durante la construcción se procurará que cada una de estas partes pueda ser armada independientemente, lo cual facilitará el ensamblaje total del Deshidratador y la colocación y seguimiento de los sistemas de control automático.

El diseño y construcción de la Vagoneta que transportará el alimento será descrito por completo en el Capítulo 6, partiendo de los Cálculos Básicos presentados en el Capítulo 5.

#### **4.1.1 DESCARGA DE FLUJO**

Ésta sección es la encargada de generar flujo de aire, el cual será transferido longitudinalmente hacia el túnel. Se puede considerar como una fase vital ya que su direccionamiento, en complemento con el Túnel de Secado, producen el efecto Contracorriente que permitirá llevar a cabo la deshidratación de la naranja y pimienta dentro de la máquina.

Su único componente es un Blower, cuyas características pueden observarse en el Anexo 1.1, las mismas que han sido determinadas gracias a los cálculos realizados en el Capítulo 5. Por limitaciones de espacio y costos se buscará un Blower que cumpla con los requerimientos básicos pero que sea compacto y de fácil manipulación.

#### **4.1.2 CALENTADOR**

El objetivo primordial de esta sección será calentar el aire proveniente del Blower. Para incrementar su eficiencia, será conectado directamente a la salida de la transición que permite adaptar el boquete de 4 pulgadas de diámetro

(descarga del Blower) al túnel de secado. Esta configuración fue así determinada puesto que es más factible calentar aire a una velocidad más baja, como la que se encuentra a la salida de la transición. Además, se consideró que la distribución de las resistencias debía cubrir la mayor cantidad de espacio posible, asegurando que el calentamiento del aire sea uniforme.

Los componentes principales del soplador son: una estrella de mica resistente al calor, la cual posee orificios que guían el paso del hilo resistivo y sirven como soporte para la distribución del mismo. Este tipo de mica puede ser encontrado en los talleres de reparación de duchas eléctricas ya que es utilizada para cubrir resistencias, dependiendo de la función que cumplan.

También estará compuesta por un juego principal de resistencias eléctricas, que funcionarán en conjunto con una resistencia auxiliar, la cual será la encargada del control de temperatura de flujo<sup>24</sup>.

El material utilizado para conformar las resistencias del calefactor será la Niquelina, debido a su abundancia comercial, precio módico y poder calórico. Las características básicas de este hilo resistivo son determinadas según los requerimientos caloríficos, obtenidos en el capítulo destinado a Cálculos Básicos en el Proceso de Deshidratación (Capítulo 5).

### **4.1.3 DISTRIBUCIÓN Y DEFLEXIÓN**

Ésta es el área encargada de distribuir correctamente el flujo de aire caliente a lo largo del túnel.

---

<sup>24</sup> Para referencia sobre Control de Temperatura ver el apartado “Descripción de Funcionamiento” del Capítulo 4 y “Control de Temperatura” del Capítulo 7.

Su único componente es un juego de placas deflectoras tipo Plénum, sin embargo, esta sección posee una pequeña antesala de aproximadamente 20cms de longitud, la cual permite que el aire que ingresa desde el calentador se acumule en este espacio y se distribuya uniformemente al pasar por las placas, las cuales también provocarán que el flujo del aire adopte comportamientos de turbulencia, un factor muy importante en la deshidratación de alimentos ya que permite un aumento en la velocidad de transferencia de masa.

La estructura de acrílico que conforma esta cámara tendrá un sistema manual de ventilación, conformado por persianas que serán abiertas o cerradas conforme la necesidad de flujo de aire.

Las placas deflectoras serán manufacturadas con acero de características similares al utilizado en el Túnel de Secado o cerámica corriente. Su separación será de aproximadamente 2,5 cm. entre placas, y tendrán un ángulo de posicionamiento creciente, dependiendo de su ubicación a lo largo del soporte. El Anexo 1.1 permite tener una idea más clara de cómo se verán las placas tipo Plénum dentro de la máquina.

#### **4.1.4 TÚNEL DE SECADO**

El Túnel de Secado representa un desafío particular ya que es aquí donde se concentran la mayor parte de componentes y es dentro de este donde se determinan los tiempos de secado.

Compuesto por dos bandas transportadoras (Ver Anexo 1.1) el Túnel de Secado es la sección en donde, en conjunto con el direccionamiento del flujo, se creará el fenómeno contracorriente y es aquí donde se cumplirá el proceso de secado. Cada banda transportadora constará de un motor de corriente continua y una serie de rodillos de transmisión, cuyo número será determinado en el Capítulo 5.

También contará con cuatro medidores de temperatura; dos de los cuales serán de bulbo seco y dos de bulbo húmedo. Se colocará un medidor de cada tipo a la entrada del túnel y a la salida del mismo; esto permitirá mantener un control de la temperatura de secado inicial y final, así como la humedad residente dentro del ducto. Para la medición de la humedad se deberá relacionar la medida entregada por el control con una carta psicrométrica apropiada para la presión de la Ciudad de Quito. En caso de disponerlo, se puede hacer uso de un higrómetro adecuado para evitar la apreciación gráfica de la carta psicrométrica.

A pocos centímetros de la entrada del Túnel de Secado se colocará una chimenea, la cual permitirá la salida del aire húmedo, producto del proceso de deshidratación. Esto evitará la humidificación del alimento que se encuentra, fuera de la entrada del prototipo.

Tanto la entrada como salida de vagonetas del Deshidratador estarán cubiertas por cortinas plásticas que evitarán la pérdida de calor hacia el entorno. También se considerará la posibilidad de construir una pequeña cámara de acrílico a la salida del secador, con el fin de reducir el escape de energía que se presentará cada vez que la vagoneta finalice su proceso; sin embargo, la colocación y manufactura de esta sección adicional puede representar un costo adicional, y la utilización de espacio excesivos.

Tres de los sistemas electrónicos que serán utilizados para el control del proceso se localizan en el túnel; estos están conformados por los puntos de control #2, #3, #6, #7 y #8, que pueden ser localizados en el Anexo 1.2, y que conforman el control de temperatura y sistema de medición, y los puntos #4 y #5, encargados de la regulación y activación de las bandas de entrada y salida.

Adicionalmente, se deberán considerar las dimensiones de las rampas de entrada y salida de vagonetas, las mismas que, sin ser necesariamente vitales

para el proceso de secado, facilitarán en gran manera el ingreso y salida del producto.

## **4.2 DIMENSIONAMIENTO DEL TÚNEL DE SECADO**

Como fue mencionado anteriormente, al ser este un Diseño Preliminar estará sujeto a cambios, los cuales pueden presentarse al momento de construir el Deshidratador; sin embargo, por cuestiones de espacio se estima que la longitud máxima del túnel, incluida la sección de distribución y deflexión, será de 1,20m. A esto deberá añadirse la longitud del sistema calentador y de descarga de flujo para obtener la longitud total del Deshidratador. Las dimensiones correspondientes a estas dos secciones serán determinadas al momento de construir el calentador y escoger el Blower.

El Anexo 1.3 muestra gráficamente cuál será la distribución del espacio que conformará el túnel de secado.

## **4.3 DESCRIPCIÓN DE FUNCIONAMIENTO**

El diseño de este Deshidratador de Túnel Contracorriente ha sido realizado con la finalidad de ofrecer un proceso de secado que sea, en su mayor parte, automatizado y con la mínima intervención humana en el proceso.

En este apartado se describirán tanto el funcionamiento general del Deshidratador como de los sistemas de control que lo componen.

### 4.3.1 FUNCIONAMIENTO GENERAL

Para la descripción general sobre el funcionamiento del Deshidratador se hará referencia al Anexo 1.4 y se partirá desde cada parte presente en este diagrama para describir el modo de operación conjunto de la máquina.

Para esto se explicará el comportamiento de la máquina en función a sus Secciones, se omitirán explicaciones sobre el papel del control automático en este proceso ya que se le destinará su propio apartado dentro de este Capítulo.

#### *Sección #1: Descarga de Flujo:*

Al ser encendido el Blower, este descargará aire a temperatura ambiente, entre 18°C y 22°C, que será transmitido al calentador.

#### *Sección #2: Calentador:*

El calentador tiene la función de incrementar la temperatura del aire que proviene del Blower. Para lograr temperaturas apropiadas de secado (35°C – 45°C) y para alargar el tiempo de vida útil de las resistencias, se encenderán únicamente las resistencias durante un tiempo máximo de 5 minutos. El mantener el hilo de níquelina en funcionamiento sin flujo de aire puede producir daños al calefactor, sin embargo, durante las pruebas de secado (Ver Capítulo 9) se apaga el Blower repetidamente durante periodos de dos minutos; esto permite controlar la temperatura de residencia en el túnel sin provocar daños en los materiales que constituyen el calefactor.

Sin flujo de aire, el calefactor puede alcanzar temperaturas de hasta 90°C; sin embargo al permitir la entrada de aire al túnel la temperatura baja hasta alcanzar rangos de entre 35°C a 60°C (depende directamente del tipo de aislamiento que se presente el túnel).

### *Sección #3: Distribución y Deflexión:*

Una vez que el aire se ha calentado, saldrá hacia el Túnel donde será retenido en una pequeña cámara cuya área es de aproximadamente  $0.1 \text{ m}^2$ , con una capacidad volumétrica de  $0.04 \text{ m}^3$ . El flujo de aire caliente llenará esta cámara de distribución y será empujado hacia las placas deflectoras, las cuales, debido a su inclinación harán que el flujo adopte nuevamente un comportamiento turbulento y se distribuya uniformemente cubriendo, casi en su totalidad, el área destinada al Túnel de Secado.

### *Sección #4: Túnel de Secado:*

La banda transportadora de entrada del túnel se mantendrá en constante movimiento, variando su velocidad en función del producto a deshidratar. Su dirección será contraria a la del flujo de aire. Una vez que la vagoneta haya llegado al final de esta banda, será transportada a una segunda banda, que tiene como objetivo permitir la salida del producto.

La banda transportadora de salida será activada una vez que la vagoneta haya llegado al Limit Switch (fin de carrera) ubicado a un costado de los rodillos de transmisión<sup>25</sup>.

De la misma manera, se desactivará la banda el momento que la vagoneta deje de hacer contacto con el interruptor de Fin de Carrera.

Esta última banda mantendrá una velocidad constante ya que su propósito no es el de prolongar la estadía del producto dentro del túnel; un exceso en el tiempo de residencia de la vagoneta sobre la banda de salida podría provocar que el alimento se vea expuesto a temperaturas demasiado altas (debido a la cercanía

---

<sup>25</sup> Ver Anexo 1.2 para referencia sobre puntos de control: Fin de Carrera.

del calentador) y que, como consecuencia de esto, pierda algunas de sus propiedades.

El tiempo de residencia que tendrá el alimento dentro del túnel será determinado experimentalmente, como se indica en el Capítulo 5.

### **4.3.2 FUNCIONAMIENTO DE LOS SISTEMAS DE CONTROL**

Este prototipo de Deshidratador de Túnel Contracorriente tendrá aproximadamente 8 Puntos de control, que serán manejados desde 4 Sistemas de Control (Ver Anexo 1.2). Los circuitos y programación correspondientes a cada Sistema serán detallados en el Capítulo 6; en este apartado se describirá únicamente su funcionamiento.

*Sistema de Control #1: Control Blower.*

Este sistema se encarga, específicamente, del encendido y apagado del Blower, así como de la selección de producto a deshidratar.

Al colocar el selector en la posición ON, el Blower empezará a funcionar, de igual manera, se podrá elegir qué producto se desea ingresar ya sea naranja o pimienta.

Ambas órdenes serán desplegadas en el Display LCD ubicado en medio de ambos selectores.

El selector de producto (Ver Anexo 1.5) trabajará en conjunto con el *Sistema de Control #3*, ya que este es el que indicará la velocidad a la que debe moverse la banda de ingreso.

A pesar de que ambos selectores trabajan de forma independiente, se recomienda que primero se active el switch encargado del encendido del Blower, esto permitirá que el flujo se precaliente<sup>26</sup> y se distribuya a lo largo del túnel.

### *Sistema de Control #2: Control de Temperatura Salida, Banco de Resistencias y Auxiliar.*

Este es uno de los sistemas de control más complejos en el Diseño y Construcción de este deshidratador. Está conformado por 2 medidores electrónicos de temperatura, dos relés de control y un Display LCD. Cada medidor tendrá una tarea especial: uno conformará un sensor de bulbo seco mientras el otro fungirá como sensor de bulbo húmedo.

Su función es la de desplegar la lectura de temperatura procedente del elemento electrónico y según esta activar o desactivar la resistencia auxiliar, encargada de controlar la cantidad de calor que se emitirá hacia el túnel.

Su funcionamiento, aunque a simple vista parezca sencillo, implica conexiones electrónicas complejas y programación especial<sup>27</sup>.

Funciona independientemente de otros sistemas de control y es activado en el momento en que el interruptor secundario de la máquina es activado. El medidor electrónico recibirá la lectura de temperatura y la desplegará en el Display LCD; si su temperatura es menor a 50°C procederá a encender el relé encargado de la activación de la resistencia auxiliar. Por otro lado, si el valor medido excede los 60°C se cortará la alimentación eléctrica a esta resistencia, permitiendo que

---

<sup>26</sup> El *Sistema de Control #2* debe ser activado antes que ningún otro debido a que, gracias a las resistencias que lo componen, el flujo de aire puede ser precalentado.

<sup>27</sup> Ver Capítulo 7 para referencia sobre conexiones electrónicas y programación.

la temperatura disminuya. Este proceso es permanente y controlado en su totalidad por microprocesadores electrónicos.

Este sistema de control debe ser activado conjuntamente con el sistema de Control #1 (Blower) previo a la ubicación del producto a secar dentro de el túnel. Este procedimiento cumplirá la función de precalentar el túnel de secado y condicionarlo para el proceso de deshidratación. La duración del mismo dependerá de las condiciones termodinámicas iniciales del túnel; se esperará hasta que las lecturas de temperatura lleguen a los 25°C.

#### *Sistema de Control #3: Control Motores de Banda de Ingreso y Salida:*

Este sistema de control se activa una vez que se ha determinado qué tipo de producto se desea deshidratar. El microcontrolador encargado de la selección de producto se comunica con el microcontrolador de este sistema indicando la velocidad y el tiempo que debe permanecer encendida la Banda de Ingreso al Túnel.

Por otro lado, la banda de salida entra en funcionamiento cuando el sistema ha recibido información proveniente del Limit Switch, el cuál indica que la vagoneta ha llegado al final del túnel y que está lista para salir del mismo.

Ambas órdenes son desplegadas en el Display LCD ubicado en la parte derecha del panel de control.

#### *Sistema de Control #4: Control de Temperatura Salida*

Este es el sistema de control más sencillo presente en el Deshidratador, su función principal es la de sensar la temperatura existente en la entrada del túnel y así poder registrar en qué condiciones se da inicio al proceso de secado.

Al igual que el *Sistema de Control #2*, este controlador consta de dos medidores electrónicos de temperatura: uno de bulbo seco y uno de bulbo húmedo. El primero permitirá conocer la temperatura actual del aire y el segundo la cantidad de humedad existente.

Ambas lecturas serán transmitidas al Display LCD, donde serán comparadas con aquellas pertenecientes al *Sistema de Control #2*.

Estas temperaturas permitirán establecer las humedades relativas del aire en cada sección haciendo uso de una carta psicrométrica (Ver Anexo 6).

# 5

## CÁLCULOS BÁSICOS DEL PROCESO DE DESHIDRATACIÓN

Para llevar a cabo un proceso de deshidratación, es necesario realizar cálculos básicos que permitan definir valores que guiarán el diseño y construcción del prototipo. Asimismo, estos cálculos juegan un papel aún más vital al tratarse de una máquina deshidratadora real. Gran cantidad de estos cálculos son realizados, en su mayoría, en base a las fórmulas definidas en el capítulo 2.

Para el diseño de este prototipo de Deshidratador de Túnel Contracorriente, se han separado los cálculos según las etapas que se manejarán en la máquina, las cuales serán denominadas como:

1. Etapa de Carga,
2. Etapa de flujo de aire y temperatura,
3. Etapa de movimiento-arrastre.

Se debe hacer énfasis en que, al ser este el diseño de un prototipo de máquina, existió la necesidad de asumir ciertos valores, los mismos que serán justificados en el apartado 5.1 de este capítulo. Además, la evaluación experimental del prototipo permitirá corroborar los valores asumidos como correctos o, por el contrario, identificar los parámetros de diseño que fueron considerados de forma errónea así como regularlos para obtener los resultados requeridos.

## 5.1 JUSTIFICACIÓN DE VALORES EN DISEÑO

Con el objetivo de proceder con las subsiguientes fases de diseño del prototipo, ha sido necesario establecer algunos valores “predeterminados” que en este caso corresponden a la longitud final del túnel de secado, donde se incluyen aproximadamente 50 centímetros correspondientes al intercambiador de calor, y al Número de Reynolds que será utilizado como referencia para los cálculos de flujo de aire.

### 5.1.1 NÚMERO DE REYNOLDS

Para realizar los cálculos correspondientes a la cantidad de flujo de aire requerido y potencia del intercambiador de calor, se asume que el valor del Número de Reynolds es igual a 30000, condición de régimen turbulento.

La predeterminación de este valor puede justificarse de la siguiente manera:

Mediante una cuidadosa minimización de las perturbaciones externas, es posible mantener un fluido laminar para números de Reynolds hasta de 50000. Sin embargo, cuando  $N_R$  es mayor que aproximadamente 4000, una perturbación menor de la corriente de flujo ocasionaría un cambio súbito en el flujo de laminar a turbulento.<sup>28</sup>

Un flujo turbulento siempre será el ideal para los procesos de deshidratación en donde las moléculas de agua deben ser transportadas en el aire. Según Robert L. Mott, en su obra “Mecánica de Fluidos Aplicada” un número de Reynolds superior a 4000 asegura, con escasas excepciones, un flujo cuyo régimen es

---

<sup>29</sup> Robert L. Mott, Mecánica de Fluidos Aplicada, Capítulo 8, *Número de Reynolds, flujo laminar y flujo turbulento*, Pág. 223

turbulento, bajo este fundamento teórico se asume (como parámetro de diseño) un valor de Re igual a 4000.

### **5.1.2 LONGITUD DEL TÚNEL**

Se ha establecido que la Longitud total del túnel de deshidratación, sin incluir espacios de distribución (transición) y Blower, será de 1,50 metros.

Este valor ha sido elegido gracias a dos factores extremadamente importantes:

1. Limitaciones de espacio: Se pretende que el prototipo sea donado a “Jesss Christian Academy, con fines educativos, para lo cual es ideal la construcción de una máquina compacta, de fácil utilización y transporte.
2. Limitaciones económicas: Debido al alto costo que representaría la construcción de un deshidratador de túnel de dimensiones reales (cerca de 6 metros de largo), se ha decidido llevar al mínimo la longitud del mismo sin afectar el aspecto operacional. Es también importante recordar que los costos de equipos de flujo de aire, calor, transporte, arrastre, control automático, entre otros; son proporcionales con las dimensiones del prototipo.

Dentro de este túnel de 1,50 metros se ubicarán las bandas de entrada y salida, así como las placas de deflexión y el calentador (banco de resistencias y placas deflectoras). De igual manera, dentro de este túnel se colocarán los sensores de temperatura a la entrada y salida del mismo.

Periféricos a la superficie del túnel se encontrará un soplador de aire de aproximadamente 19 cms. de largo por 30 cms. de ancho. En conexión directa se encontrará una transición de 19 cms de radio y 35 cms. de largo.

Cabe recordar que las dimensiones establecidas en este capítulo corresponden a un diseño preeliminar las cuales estarán sujetas a cambios durante la construcción real de los componentes del prototipo.

### **5.1.3 TIEMPO DE SECADO**

Debido a las limitaciones que se presentaron al momento de realizar pruebas de laboratorio (falta de equipo apropiado) para la construcción de curvas de secado, los tiempos de secado serán determinados de manera experimental una vez que el prototipo esté construido. Sin embargo, durante una prueba de secado casera se obtuvieron resultados de deshidratación evidente (aproximadamente un 30% de humedad por deshidratar) a lo largo de 4.5 horas de proceso, tiempo que se considerará como referente durante las pruebas de secado.

Esto presenta algunas ventajas como lo son la construcción de curvas y tiempos de secado reales, resultados fidedignos en lo que concierne a la calidad del producto. Asimismo, se presentan algunas desventajas como son: largos periodos de prueba y consumo eléctrico elevado.

La forma en la que se tabularán los resultados de las pruebas serán presentados en el Capítulo 9 junto con los datos obtenidos.

### **5.1.4 TEMPERATURAS DE REFERENCIA**

Las temperaturas de referencia que se utilizarán para el diseño de este prototipo serán de 18°C como mínima, 1.5 grados mayor a la temperatura del aire en condiciones normales en la ciudad de Quito y 60°C como máxima. La

temperatura máxima no deberá superar su valor ya que se corre el riesgo de que el producto final de deshidratación resulte estropeado, o sus propiedades organolépticas no cumplan con los requerimientos establecidos para este proyecto.

La temperatura de referencia con la que se establecerán los valores básicos corresponderá al promedio de la temperatura mínima y máxima. Esto es posible hacerlo debido a la poca diferencia que se percibe entre las propiedades del aire a 18°C y 60°C.

### **5.1.5 CARGA DE VAGONETA Y BANDEJAS**

Cada bandeja tendrá aproximadamente una carga de 0.34kg, indistintamente de si el producto es pimienta o naranja. Esto se logrará en función de la geometría de corte de cada fruta o verdura. Cada vagoneta contará con 5 bandejas, siendo la carga total igual a 1.68kg +/- 0.25kg.

Estos valores se obtuvieron de forma experimental, una vez que se impusieron las dimensiones de cada bandeja (30 cm x 20 cm) en consideración a las limitaciones de espacio existentes en el túnel.

A partir de esto se realizó el diseño de la vagoneta, el cual es desplegado con mayor detalle en el capítulo 6.

### **5.1.6 RODILLOS Y EJES**

Por limitaciones de espacio, los rodillos y ejes no pueden ser voluminosos; debido a esto se ha decidido que el diámetro mayor de cada rodillo será de 4 cm incluidos los ejes. Los rodillos serán cubiertos por una capa de lona resistente para conformar las bandas de entrada y salida.

Las dimensiones de cada eje son iguales, sin embargo, aquel encargado del movimiento rotacional y que va conectado directamente con el motor DC puede presentar variaciones en sus medidas y geometría, dependiendo de los requerimientos de maquinado que se presenten para acoplamiento motor – eje.

El diámetro correspondiente a los ejes será determinado mediante cálculos de resistencia estática y a la fatiga.

Por limitaciones económicas no se adquirirán rodillos industriales prefabricados; una alternativa viable sería optar por una vulcanización de caucho sobre el eje. El diámetro total del rodillo será de 3 cm, el espaciado entre cada uno será de 2.5 cm. Esta distancia entre rodillos se muestra eficiente para el transporte de la vagoneta ya que evita la existencia espacios huecos significativos en los cuales la carga pueda atascarse durante el recorrido.

Sin embargo, en aprovechamiento de un remate, se seleccionaron rodillos prefabricados que anteriormente pertenecieron a una caminadora. Los rodillos presentan dimensiones adecuadas, tienen rodamientos internos no visibles, lo cual no permite que se pueda detallar su composición interna en los planos mecánicos.

La banda de entrada estará conformada por 12 rodillos mientras que la de salida contará con 6. Un total de 18 rodillos serán utilizados en el túnel, uno de los cuales estará acoplado a su respectivo motor. Para el acoplamiento del motor se

determinó que en lugar de un rodillo común se colocaría un eje macizo de acero de transmisión, el cual sería torneado para que adquiriera las medidas deseadas, y también sería sometido a un proceso de moleteado en el torno para que se cree una fuerza de tracción que permita que el movimiento del eje produzca el desplazamiento de la banda.

## 5.2 DEFINICIÓN DE VALORES BÁSICOS

Todos los valores básicos que se encuentren en este Capítulo corresponden a propiedades físicas del aire, las cuales son determinadas por medio de tablas termodinámicas preestablecidas y evaluadas a una temperatura de referencia de 39°C, valor promedio entre 18°C y 60°C; temperatura mínima y máxima respectivamente.

### 5.2.1 PROPIEDADES FÍSICAS DEL AIRE.

Temperatura		Conductividad Térmica ( <i>k</i> )	Viscosidad ( $\mu$ )	Viscosidad Cinemática ( $\nu$ )	Densidad ( $\rho$ )	Calor Específico ( <i>C<sub>p</sub></i> )
°C	K	W/m · K	( $\times 10^{-6}$ s /m <sup>2</sup> )	( $\times 10^{-6}$ m <sup>2</sup> /s)	(kg/m <sup>3</sup> )	(kJ/kg · K)
30	303,15	0,0258	18,682	16,58	1,127	1,013
40	313,15	0,0272	19,515	17,6	1,092	1,014

<sup>30</sup> R. Paul Singh-Dennis R. Heldman, Introducción a la ingeniería de los alimentos, Apéndice, Tabla A.4.4, Pág. 507

Tabla 5.2 TABLA DE INTERPOLACIÓN A 39 °C PROPIEDADES FÍSICAS DEL AIRE SECO A 1 ATMÓSFERA						
Temperatura		Conductividad Térmica (k)	Viscosidad (μ)	Viscosidad Cinemática (ν)	Densidad (ρ)	Calor Específico (Cp)
°C	K	W/m · K	(x 10 <sup>-6</sup> s /m <sup>2</sup> )	(x 10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /s)	(kg/m <sup>3</sup> )	(kJ/kg · K)
39	312,15	0,02594	18,765	16,7	1,123	1,0131

## 5.2.2 COEFICIENTE DE DIFUSIÓN DEL VAPOR DE AGUA EN LA ATMÓSFERA

Este coeficiente puede obtenerse por medio de la ecuación de Chapman-Enskog (Ecuación 2.12), sin embargo también puede ser obtenida, como en este caso, por medio de información bibliográfica (“Pérdida de Agua por las plantas”, Elmer. García).

$$D_{AB} = 2,40 \times 10^{-5} \left[ \frac{m^2}{s} \right]$$

Si se desea obtener el coeficiente de difusión por medio de la Ecuación 2.12 será necesario definir el diámetro de colisión en Angstroms ( $\sigma_{AB}$ ) y la integral de colisión correspondiente a la difusión molecular ( $\Omega_D$ ), datos que no siempre pueden ser obtenidos de manera experimental.

### 5.2.3 NÚMERO DE SCHMIDT

Utilizando la ecuación 2.16 se obtiene:

$$Sc = \frac{v}{D_{AB}};$$

$$Sc = \frac{16,7 \times 10^{-6} \left[ \frac{m^2}{s} \right]}{2,4 \times 10^{-5} \left[ \frac{m^2}{s} \right]};$$

$$Sc = 0,695$$

### 5.2.4 NÚMERO DE SHERWOOD

Utilizando la ecuación 2.17 se obtiene:

$$Sh = \frac{k_L \times x}{D_{AB}};$$

ó

$$Sh = 0,664 Re^{1/2} \times Sc^{1/3};$$

$$Sh = \left[ 0,664 \times (30000)^{1/2} [N/m] \right] \times (0,695)^{1/3} [N \times s/m^2];$$

$$Sh = 101,87$$

### 5.2.5 RADIO HIDRÁULICO PARA SECCIONES TRANSVERSALES NO CIRCULARES.

El cálculo del *Radio Hidráulico* es de suma importancia ya que este permite conocer cuál es el área que va a estar irrigada por el fluido.

Al ser el túnel de secado un ducto de distribución se lo considera como una sección transversal y al tener una figura rectangular se denomina no circular.

Para poder calcular el Radio Hidráulico es necesario saber cuál es el valor del perímetro mojado y el área del ducto<sup>30</sup>.

*Radio hidráulico:*

$$R = \frac{A}{PM} = \frac{\text{Área}}{\text{PerímetroMojado}} \quad (5.1)$$

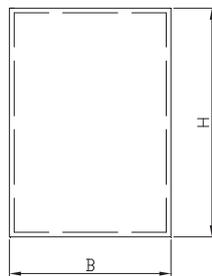


Fig. 5.1

El gráfico permite observar los diferentes lados del rectángulo que deben ser duplicados y posteriormente sumados con la finalidad de obtener el perímetro mojado de la figura 5.1. Este valor permitirá, a su vez, obtener el radio hidráulico del ducto.

---

<sup>31</sup> Robert L. Mott, *Mecánica de Fluidos Aplicada*, Cáp. 8, *Número de Reynolds, flujo laminar y flujo turbulento*, Pág. 227. Ed. Prentice Hall.

*Perímetro Mojado:*

$$PM = 2B + 2H \quad (5.2)$$

*Área:*

$$A = B \times H \quad (5.3)$$

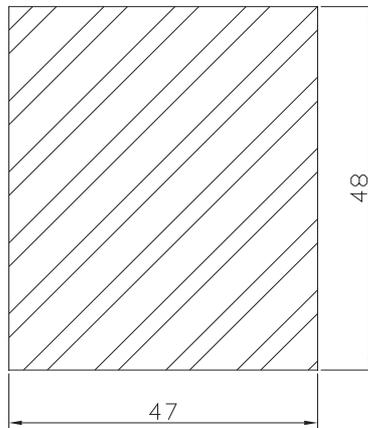


Fig. 5.1

*Dimensiones de Ducto*

La figura muestra una representación en 2D de las dimensiones reales del ducto que conforma el túnel de secado.

Autora: Daniela Villarroel Guevara.

Entonces:

$$A = B \times H;$$

$$A = 0,47m \times 0,48m;$$

$$A = 0,225m^2$$

$$PM = 2B + 2H;$$

$$PM = 2(0,47m) + 2(0,48m);$$

$$PM = 1,9m$$

$$R = \frac{A}{PM};$$

$$R = \frac{0,225m^2}{1,9m};$$

$$R = 0,118m$$

### 5.2.6 NÚMERO DE REYNOLDS PARA SECCIONES TRANSVERSALES NO CIRCULARES CERRADAS

El número de Reynolds para flujos que se encuentran en secciones no circulares se calcula de manera muy similar a la presentada en el capítulo 2 (ecuación 2.6). La única diferencia radica en que, el diámetro  $D$  es sustituido por 4 veces el radio hidráulico  $R$ .

Robert L. Mott demuestra la validez de esta sustitución calculando el radio hidráulico para un conducto circular.<sup>32</sup>

---

<sup>32</sup> Robert L. Mott, *Mecánica de Fluidos Aplicada, Cap.8, Número de Reynolds, flujo laminar y flujo turbulento*. Pág. 229, Ed. Prentice Hall.

$$R = \frac{A}{PM} = \frac{\pi D^2 / 4}{\pi D} = \frac{D}{4};$$

$$\therefore \quad (5.4)$$

$$D = \frac{4}{R}$$

Por lo tanto, reemplazando D por el resultado de la ecuación 4.4 obtendremos el siguiente Número de Reynolds:

$$Re = \frac{Vx4R}{\nu} \quad (5.5)$$

Establecido permanentemente que el valor del Número de Reynolds será igual a 30000 se puede obtener la velocidad de flujo a partir de la Ecuación 5.5.

Despejando V obtenemos:

$$V = \frac{Re \times (\nu)}{4R};$$

$$V = \frac{(30000) \times 16,7 \times 10^{-6} \left[ \frac{m^2}{s} \right]}{4 \times 0,118 [m]};$$

$$V = 1,061 \left[ \frac{m}{s} \right]$$

Para asegurar esta velocidad de flujo y la turbulencia que un soplador de estas características entregaría se escogerá un equipo que genere un flujo de aire con una velocidad máxima de 1,3 m/s.

## 5.2.7 CANTIDAD DE FLUJO DE VOLUMEN

La cantidad de flujo de volumen nos indica cuánto aire se distribuirá en determinada área.

$$\dot{V} = AxV \quad (5.6)$$

ó

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho} \quad (5.7)$$

Donde:

- $\dot{V}$  : flujo volumétrico o cantidad de flujo de volumen ( $m^3/s$ ).
- $\dot{m}$  : flujo másico o cantidad de flujo de masa (m/s).

Así obtenemos:

$$\dot{V} = AxV;$$

$$\dot{V} = 0,225[m^2] \times 1,3 \left[ \frac{m}{s} \right];$$

$$\dot{V} = 0,2925 \left[ \frac{m^3}{s} \right]$$

Este valor es un requerimiento al momento de escoger un soplador para el túnel de secado. Para esto es necesario transformar las unidades de  $m^3/s$  a CFM. Los

CFM son unidades más conocidas comercialmente, y facilitarán el proceso de búsqueda del soplador.

Es bueno recordar que los CFM son el equivalente a  $\text{pie}^3/\text{min}$ ; así tenemos:

$$\dot{V} = 0,2925 \left[ \frac{m^3}{s} \right] \times \frac{35,3}{1} \left[ \frac{ft^3}{m^3} \right] \times \frac{60}{1} \left[ \frac{s}{\text{min}} \right];$$

$$\dot{V} = 619,5 \left[ \frac{ft^3}{\text{min}} \right] \cong 600 \left[ \frac{ft^3}{\text{min}} \right];$$

$$\dot{V} = 600 [CFM]$$

Este dato permite escoger un equipo soplador cuyo principal requerimiento será que produzca una cantidad de flujo igual a 600 CFM. Sin embargo, existe la posibilidad de que no se comercialice un soplador con esta característica, por lo cual se deberá elegir aquel equipo que más se aproxime a este requerimiento, siendo preferible un equipo que supere este valor o que posea algún tipo de control (electrónico o mecánico) de cantidad de flujo.

### 5.2.8 FLUJO DE MASA

El flujo de masa también es conocido como caudal másico, y se obtiene a partir del caudal volumétrico.

Este flujo se calculará gracias a los valores obtenidos previamente, sin embargo; también podría ser determinado por medio de las características del soplador en caso de que este hubiera sido escogido previo a los cálculos básicos.

La ecuación del flujo másico se obtiene a partir de la ecuación 5.7:

$$\dot{m} = (\dot{V} \times \rho) \quad (5.8)$$

Así tenemos:

$$\dot{m} = 0,2925 \left[ \frac{m^3}{s} \right] \times 1,123 \left[ \frac{kg}{m^3} \right];$$

$$\dot{m} = 0,3284 \left[ \frac{kg}{s} \right]$$

## 5.2.9 VELOCIDAD DE TRANSFERENCIA DEL CALOR

La velocidad de transferencia de calor sirve como referencia para saber cuáles serán los requerimientos caloríficos para calentar un flujo másico de 0,3284Kg/s. En otras palabras, nos indica cuánto calor se debe emitir para calentar una determinada masa de aire a cierta temperatura. La ecuación para el cálculo de la transferencia de calor es la siguiente:

$$\dot{Q} = \dot{m} \times C_p \times \Delta T \quad (5.9)$$

A partir de esto se obtiene:

$$\dot{Q} = 0,3284 \left[ \frac{kg}{s} \right] \times 1,0131 \left[ \frac{KJ}{kg^\circ C} \right] \times 42^\circ C;$$

$$\dot{Q} = 13,973 \left[ \frac{KJ}{s} \right]$$

Es necesario recordar que un Caudal alto asegura la presencia de flujo de aire con régimen turbulento y de la misma manera, un flujo de este tipo permite un proceso de deshidratación más eficiente.

Gracias a esto se puede saber que, al obtener una diferencia de temperatura mayor a 42°C, se está entregando una cantidad de calor de 13,973 KJ por unidad de tiempo (s).

Sin embargo, para un prototipo de dimensiones reducidas el consumo de 9000 W puede resultar excesivamente costoso, lo que provocará que la utilización de la máquina no sea rentable debido al alto gasto operativo que representaría. Por lo tanto se utilizará como potencia máxima, 2,4KW los que, gracias a experiencias previas, aseguran que dentro del túnel se mantendrá una temperatura de entre 50 y 55 grados centígrados.

Este cambio en el valor de potencia de las resistencias tuvo base en experimentos realizados previamente durante la construcción de un calentador. Los detalles del mismo se describen en la sección 5.2.10.

### **5.2.10 CÁLCULO DE LAS RESISTENCIAS**

Para el cálculo de las resistencias fue necesario basarse en una experiencia previa desarrollada por alumnos de la Universidad de las Américas de Puebla. Estos estudiantes obtuvieron temperaturas de hasta 50°C utilizando resistencias de Nicromo (80% Ni-20% Cr) de 1300W.

Bajo esta perspectiva se realizaron experimentos con resistencias de 600W las cuales presentaban temperaturas de hasta 25°C con algunas variaciones menores.

Para la construcción del calentador de este Deshidratador se ha decidido trabajar con 4 resistencias de 600W construidas con Niquelina, cuyas características son similares al Nicromo. La conformación de las resistencias será explicada en el Capítulo correspondiente a Proceso de Construcción.

La selección de la longitud y diámetro del hilo de Nicromo tuvo base en las especificaciones técnicas del mismo.<sup>31</sup>

*Para determinar la temperatura obtenida en una resistencia de 600W:*

$$T^{\circ} = \frac{600[W] \times 50[{}^{\circ}C]}{1300[W]};$$

$$T^{\circ} = 23^{\circ}C$$

Esta relación se obtuvo gracias a las prácticas realizadas por los alumnos de la Universidad de las Américas de Puebla durante la construcción de un prototipo de horno deshidratador estático.

Así, cada resistencia alcanzará una temperatura de 23°C, por lo tanto serán necesarias 4 resistencias para que lleguen, y sobrepasen, los 60°C. Cada resistencia tendrá su propia fuente de alimentación a 110V, es decir que estarán conectadas en paralelo.

$$T^{\circ} = 23^{\circ}C \times 4;$$

$$T^{\circ} = 92^{\circ}C$$

---

<sup>33</sup> Especificaciones técnicas del hilo de Niquelina. Ver Anexo 4.1.

Esta diferencia de temperaturas servirá como colchón para contrarrestar posibles fugas de calor debido a rendijas no aisladas presentes en el túnel.

Asimismo, el tener 4 resistencias individuales de 600W cada una permitirá que se realice un control electrónico de temperatura más certero ya que se mantendrán tres resistencias como permanentes en el banco principal y la cuarta se convertirá en la auxiliar, con la función de encenderse si la temperatura baja de los 50°C, o apagarse si sobrepasa los 60°C.<sup>32</sup>

Por otro lado, es necesario considerar que el flujo de aire a ser calentado tendrá una temperatura inicial de entre 16°C y 18°C; por lo tanto, existirá una diferencia de aproximadamente 74°C entre la sección de descarga y el calentador, por lo que se obtendrá una temperatura promedio de 55°C, valor ideal para llevar a cabo un proceso de secado.

*Temperatura Promedio:*

$$\bar{T} = \frac{T_f + T_c}{2};$$

$$\bar{T} = \frac{18^{\circ}\text{C} + 92^{\circ}\text{C}}{2};$$

$$\bar{T} = 55^{\circ}\text{C}$$

Donde:

- $T_f$ : es igual a la temperatura ambiente a la cual es descargado el flujo de aire.
- $T_c$ : es equivalente a la temperatura teórica alcanzada por el banco de resistencias y su auxiliar.

---

<sup>34</sup> Para mayor información sobre el control electrónico de temperatura ver el Capítulo 6: Control automático.

Este último valor será obtenido por medio de la lectura del medidor de temperatura localizado al final del Túnel de Secado, cuando el Blower no está en funcionamiento.

Vale aclarar que se pueden alcanzar estas temperaturas cuando las resistencias están conectadas en paralelo, como se puede observar en la Fig. 5.2.

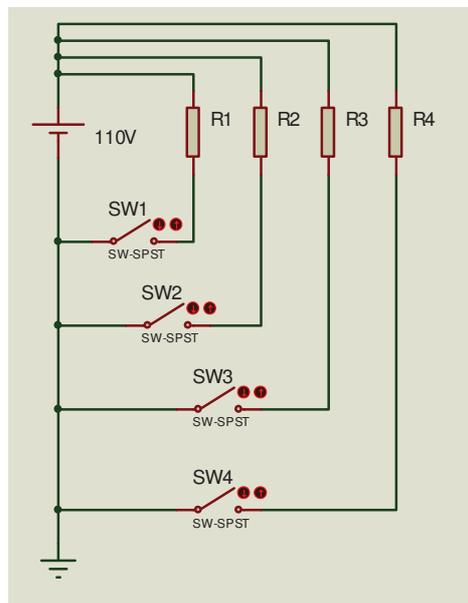


Fig. 5.2

#### *Distribución de resistencias*

El diseño de resistencias, realizado con la ayuda del programa PROTEUS permite visualizar cómo se realizará la conexión en paralelo de las diferentes resistencias.

En la Fig. 5.2, se puede ver el diagrama básico de conexión de las resistencias calefactoras. El banco principal está conformado por R1, R2 y R3, mientras que el auxiliar por R4; el control automático está representado por SW. Cada resistencia del banco está controlada por su propio relé (SW1, 2 y 3) que serán activados en forma sincrónica. Sin embargo, el SW4 permitirá el paso de

corriente conforme a lo indicado por el PIC encargado del control de temperatura.

Cada resistencia tendrá su propio switch, cada uno de ellos cumplirán una función auxiliar en caso de que exista la necesidad de hacer que el prototipo funcione sin el control automático electrónico.

Para calcular la resistencia, oposición natural que presentan los materiales al paso de corriente, que tendrá cada uno de estos elementos será necesario realizar cálculos básicos fundamentados en la Ley de Ohm.

$$V = I \times R \quad (5.10)$$

$$P = I^2 \times R \quad (5.11)$$

Igualando las dos ecuaciones se obtiene;

$$R = \frac{V^2}{P};$$

$$R = \frac{(110V)^2}{600W};$$

$$R = 20,16\Omega.$$

Dado que:

$P$  = potencia de consumo,

$V$  = voltaje,

$I$  = intensidad de corriente,

$R$  = resistencia.

De igual manera se puede calcular el consumo de corriente:

$$I = \frac{V}{R};$$

$$I = \frac{110V}{20,16\Omega};$$

$$I = 5.456A$$

Esto nos da a conocer que cada resistencia tendrá un requerimiento de corriente de alrededor de 6 Amperios.

Al utilizar 4 resistencias se espera consumir 24 A, este valor permite determinar las características que deberán tener los protectores térmicos, breakers u otro tipo de seguridad eléctrica.

La longitud que deberá tener cada resistencia se puede obtener de la siguiente manera:

$$\rho_r = \frac{R \times A}{l} \tag{5.12}$$

$$l = \frac{R \times A}{\rho_r}$$

∴

$$l = \frac{5,8\Omega \times 5.456A}{0.14};$$

$$l = 226cms$$

Donde:

$\rho_r$  = resistividad,

$R$  = resistencia,

$A$  = área del hilo,

$l$  = longitud.

Sin embargo, comercialmente, resistencias de 5,8 Ohmios que entreguen 600W de potencia se obtienen solamente en longitudes de 4 metros cada una por lo cual se deberán adquirir 16 metros de hilo de niquelina.

### **5.2.11 PÉRDIDAS DE CALOR**

Siempre que haya diferencia de temperaturas entre uno y otro ambiente existirá transferencia de calor. El túnel de secado es un medio sujeto a una temperatura específica, asimismo lo está el entorno exterior del deshidratador.

Las pérdidas de calor presentes en el prototipo son bastante significativas sin embargo, al ser este un prototipo con fines educativos no es posible recubrir al túnel con un aislante ya que esto eliminaría la visibilidad del producto durante el proceso. La estructura del túnel será fabricada con acrílico, como se pudo observar en el Capítulo 4. El acrílico común está en capacidad de soportar temperaturas considerables sin ser deformado y sus características son propicias para evitar pérdidas de calor mayores a las deseadas, siendo su conductividad térmica similar a la de la Lana de Vidrio (0,046 W/m. °K).

Sin embargo, el túnel de secado será construido con acrílico resistente al calor cuyo grosor será de aproximadamente 3mm, dimensión que no asegura que no existan pérdidas de calor o deformación notoria de la estructura, la utilización de

acrílico de mayor grosor (9mm) permitirían una disminución significativa estas pérdidas.

En caso de que se deseara colocar aislamiento térmico este debería ser realizado con un recubrimiento de lana de vidrio de 2,5cms como mínimo, espesor que asegura la retención del calor en el túnel siempre y cuando las diferencias de temperatura entre el ambiente y el aire de secado no sean mayores a 50°C.

En el caso de este prototipo se presentan pérdidas de calor de hasta 20°C, pérdidas que pueden ser consideradas como un desperdicio de energía que se traduce a mayor costo en consumo eléctrico. El aislamiento del túnel representará una disminución en los costos de operación del túnel ya que esta energía desperdiciada permanecerá dentro del prototipo permitiendo que el proceso sea más eficiente.

Las pérdidas de calor presentes en el túnel se pueden calcular de la siguiente forma:

$$Q_1 = h \times A \times (T_2 - T_1);$$

$$Q_1 = 31,26 \left[ \frac{KCal}{hxm^2 \times ^\circ C} \right] \times 2,34 [m^2] \times 27 [^\circ C];$$

$$Q_1 = 1975 \left[ \frac{KCal}{h} \right] \cong 2298,6 [W]$$

Como se puede observar, las pérdidas de calor en el prototipo son considerablemente altas lo que se traduce no solamente en un desperdicio de energía sino también en un incremento económico y de tiempo de proceso.

Con un aislamiento adecuado será posible reducir estas pérdidas al mínimo, obteniendo un proceso más eficiente

### 5.2.12 DISEÑO DE EJES

Para el diseño de ejes es necesario realizar el análisis de resistencia tanto estática como a la fatiga; esto arrojará como resultado el diámetro con el cual deberá ser construido el eje, el cual tendrá las propiedades mecánicas ideales para trabajar eficientemente bajo las condiciones prescritas en la tabla 5.3.

Se ha elegido un factor de seguridad igual a 4, el que garantizará la resistencia de los ejes durante su funcionamiento, ya que será sometido a esfuerzos normales y de torsión.

Propiedad o característica	Valor
Tipo de eje:	Maquinado Libre.
Material utilizado:	UNSG10400.
<i>S<sub>ut</sub></i> (Resistencia última):	76000Psi.
<i>S<sub>y</sub></i> (Resistencia a la fluencia):	42000Psi.
Longitud eje:	38cms.
Factor de seguridad:	4.
Potencia motor:	¼ HP.
Velocidad Angular:	3000rpm.

Para seleccionar el motor fue necesario considerar la carga total que deberá ser manejada por el equipo, la misma que es de aproximadamente 6 kilos, incluyendo vagoneta de producto y rodillos. Un motor de menor capacidad podría ser de utilidad sin embargo, comercialmente el motor de  $\frac{1}{4}$  de HP es más conocido, siendo así más accesible en términos de disponibilidad.

El análisis de diámetros para los ejes se realizará tomando en consideración que cada eje estará sometido a fuerzas flexoras y de torsión. La siguiente figura muestra la distribución de fuerzas y reacciones a ser analizadas.

Se considera que sobre cada eje existirá una carga sobredimensionada de 2Kg, la cual será equivalente a la fuerza de flexión  $F$ . Para poder diseñar ejes de forma segura y garantizar que no existirán fracturas durante el funcionamiento es necesario sobredimensionar la carga y asignar un valor mayor al real.

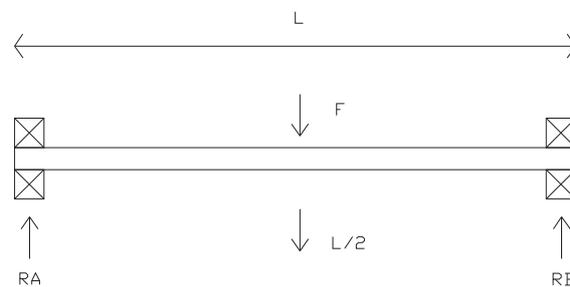


Fig. 5.3

#### *Diseño de Ejes*

En el gráfico se pueden observar las fuerzas que actuaría sobre el eje en condiciones ideales.

Sin embargo, se debe considerar que todo el análisis mecánico realizado en esta sección servirá únicamente de referencia, ya que los rodillos que serán utilizados en el prototipo son prefabricado y el eje guía corresponde a las características dimensionales de los rodillos.

Autora: Daniela Villarroel Guevara.

*Análisis: Resistencia estática.*

En primer lugar se realiza un análisis de equilibrio de fuerzas y momentos tanto en el eje X como en el eje Y:

$$\sum Fy = 0;$$

$$RA + RB - F = 0$$

$$\sum MA = 0^{+horario};$$

$$F(L/2) + RB(L) = 0$$

Si se elimina L se obtiene:

$$RB = \frac{L}{2};$$

Por lo tanto:

$$RA = RB = \frac{F}{2}$$

Donde:

$RA$  = reacción chumacera A.

$RB$  = reacción chumacera B.

$F$  = fuerza ejercida por la carga,

$M$  = momento,

$L$  = longitud,

$L/2$  = punto medio de longitud.

- Torque Máximo en función del motor:

$$Trq = \frac{63000(Potencia)}{VelocidadAngular} \quad (5.13)$$

$$Trq = \frac{63000(1/4HP)}{3000rpm};$$

$$Trq = 5.25lbf \cdot pg$$

∴

$$\sum MA = 0$$

$$2Kg(19) = -[RB(38)];$$

$$38Kg = -RB(-38);$$

$$RB = 1Kg.$$

y

$$RA + RB - F = 0;$$

$$RA = +RB + F;$$

$$RA = -1Kg + 2Kg;$$

$$RA = 1Kg.$$

Una forma sencilla de comprobar que este cálculo está bien realizado, consiste en analizar cuál es la carga total de cada eje y en cuantos puntos se debe repartir. Son 2Kg de carga que tienen que ser distribuidos en dos chumaceras (RA y RB), el promedio de 2Kg es igual a 1Kg. Por lo tanto, cada chumacera deberá soportar un peso total a 1Kg.

El diagrama de momentos flectores, figura 5.3, nos indica que la mayor fuerza de flexión se encuentra efectivamente situada en el centro de eje.

Diagrama de Momentos Flectores

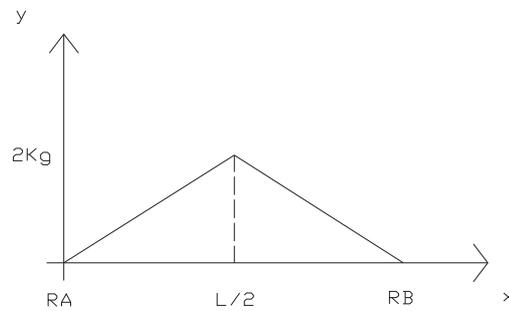


Fig. 5.4

*Diagrama de Momentos Flectores*

Este diagrama representa en qué puntos existe un mayor momento flector y que zonas del eje están sujetas a la mayor fuerza dentro del sistema.

Autora: Daniela Villarroel Guevara.

- Momento Máximo:

$$\rightarrow 0 \leq L/2;$$

$$L/2 = 19\text{cms.};$$

$$M = RA(x);$$

$$x = 0 \Rightarrow M = 0;$$

$$x = 19 \Rightarrow M = (1)(19); M = 19.$$

$$\rightarrow L/2 \leq x \leq L$$

$$L = 38\text{cms.};$$

$$M = RA(x) - F(x - L/2);$$

$$x = 19 \Rightarrow M = RA(19); M = (1)(19); M = 19;$$

$$x = 38 \Rightarrow M = 0.$$

∴

$$M_{\text{máx}} = 19\text{Kg} \cdot \text{cm} \approx 106.17\text{lb} \cdot \text{pg}.$$

Donde  $x$  es la distancia en la cual se están analizando los momentos.

Esfuerzo cortante máximo:

$$\partial_{\text{máx}} = \frac{Sy}{2\eta} \quad (5.14)$$

$$\sigma_x = \frac{M_{\text{máx}}(32)}{\pi d^3} \quad (5.15)$$

$$\partial_{xy} = \frac{Trq_{\text{máx}}(16)}{\pi d^3} \quad (5.16)$$

$$\partial = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + (\partial_{xy})^2} \quad (5.17)$$

Donde:

$\partial M_{\text{máx}}$  = esfuerzo cortante máximo,

$S_y$  = resistencia a la fluencia,

$\eta$  = factor de seguridad,

$\sigma$  = esfuerzo normal,

$\sigma_{xy}$  = esfuerzo normal en el eje y o x,

$M_{\text{máx}}$  = momento máximo,

$T_{\text{r}q_{\text{máx}}}$  = torque máximo.

Debido a que no existen esfuerzos en el sentido del eje, se considera que  $\sigma_y$  es equivalente a cero.

$$\partial = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - 0}{2}\right)^2 + (\partial_{xy})^2};$$

$$\partial = \sqrt{\left(\frac{M_{\text{máx}}(32)}{2\pi d^3}\right)^2 + \left(\frac{T_{\text{máx}}(16)}{\pi d^3}\right)^2};$$

$$\frac{S_y}{2\eta} = \frac{16}{\pi d^3} \sqrt{(M_{\text{máx}})^2 + (T_{\text{máx}})^2};$$

$$\frac{S_y}{2\eta} = \frac{16}{\pi d^3} \sqrt{(106.17[\text{lb} \cdot \text{pg}])^2 + (5.25[\text{lb} \cdot \text{pg}])^2};$$

$$\frac{S_y}{2\eta} = \frac{16}{\pi d^3} (106.3[\text{lb} \cdot \text{pg}]);$$

$$d = \left(\frac{16(2x4)}{\pi(42000[\text{lb} \cdot \text{pg}])} (106.3[\text{lb} \cdot \text{pg}])\right)^{1/3};$$

$$d = 0.47 \text{ pg} \approx 1.2 \text{ cms.}$$

*Análisis: Resistencia a la Fatiga.*

$$S_e = k_a \times k_b \times k_c \times k_d \times k_e \times S'_e \quad (5.18)$$

$$k_a = a(S_{ut})^b \quad (5.19)$$

$$S'_e = 0.5 \times S_{ut} \quad (5.20)$$

$$\eta_{\min} = \frac{S_a}{\sigma_a} = \frac{S_m}{\sigma_m} \quad (5.21)$$

$$\sigma_m = \sqrt{(\sigma_{xm})^2 + (3\partial_{xym})^2} \quad (5.22)$$

La fórmula 5.17 recibe su valor de 0.5 debido a que el  $S_{ut}$  es menor a 200Kpsi. Ver Tabla 5.3.

Donde:

$S_e$  = resistencia final a la fatiga.

$S'_e$  = límite a la fatiga.

$k_a$  = factor de superficie.

$k_b$  = factor de tamaño.

$k_c$  = factor de carga.

$k_d$  = factor de temperatura.

$k_e$  = factor de efectos diversos.

$S_{ut}$  = resistencia última.

$S$  = resistencia media ( $a.m$ ).

$\sigma_m$  = esfuerzo normal medio.

---

<sup>33</sup> Los valores de  $a$  y  $b$  pueden ser encontrados en el Anexo 4.2: Parámetros en el factor de la condición superficial de Marin.

La metodología de cálculo para los factores  $k$  puede ser encontrada en el Anexo 4.3.

$$S'e = 0.5 \times 76000 \text{Psi};$$

$$S'e = 38000 \text{Psi}.$$

$$ka = 2.67 \times (76 \text{Kpsi})^{-0.265};$$

$$ka = 0.85.$$

$$kb = 1.$$

$$kc = 0.328 \times (76 \text{Kpsi})^{-0.125};$$

$$kc = 0.19.$$

$$kd = 1.$$

$$ke = 1.$$

$\therefore$

$$Se = 0.85 \times 1 \times 0.19 \times 1 \times 1 \times 38000;$$

$$Se = 6.137 \text{Kpsi}.$$

$$\eta_{\min} = \frac{Sm}{\sigma m};$$

$$\eta_{\min} = \frac{5.56 \times 10^3 \text{ Psi}}{\sqrt{(\sigma_{xm})^2 + (3\partial_{xym})^2}};$$

$$\eta_{\min} = \frac{5.56 \times 10^3 \text{ Psi}}{\sqrt{\left(\frac{M_{\max} \times 32}{\pi d^3 \times 2}\right)^2 + 3\left(\frac{T_{\max} \times 16}{\pi d^3 \times 2}\right)^2}};$$

$$\eta_{\min} = \frac{5.56 \times 10^3 \text{ Psi}}{\sqrt{\left(\frac{106.17 \text{ lb} - pg \times 32}{\pi d^3 \times 2}\right)^2 + 3\left(\frac{2.25 \text{ lb} - pg \times 16}{\pi d^3 \times 2}\right)^2}};$$

$$\eta_{\min} = \frac{5.56 \times 10^3 \text{ Psi}}{\frac{8}{\pi d^3} \sqrt{(45088.3) + (27.56)}};$$

$$4 = \frac{5.56 \times 10^3 \text{ Psi} \times \pi d^3}{8 \times 212.535};$$

$$d = (0.389)^{1/3};$$

$$d = 0.73 \text{ pg} \approx 1.85 \text{ cms.}$$

Debido al factor de seguridad, considerablemente alto, se elegirá un diámetro de eje igual al promedio entre el obtenido en el análisis estático y a la fatiga, es decir que, el diámetro del eje será igual a 1.5cms. Esto permitirá obtener un elemento de rotación que asegurará su funcionamiento sin que presente fraccionamientos o rupturas tempranas que puedan disminuir la efectividad del prototipo.

El cálculo del diámetro se realizó utilizando la metodología aprendida durante el curso de "Mecanismos" compulsorio en la carrera de Ingeniería de Producción.

Una opción que se puede presentar para la fabricación de rodillos es la vulcanización de ejes; este proceso resulta más económico que la compra de rodillos industriales prefabricados o el maquinado de ejes macizos de acero.

# 6

## DISEÑO DE VAGONETA

Gran parte de las dimensiones establecidas para el diseño y construcción del deshidratador, han sido determinadas a partir del diseño de la vagoneta.

El objetivo principal de este pequeño vehículo es el de llevar la carga de alimento y transportarlo a lo largo de la banda de entrada hasta llegar al final del túnel. Posteriormente la vagoneta será retirada del sistema por medio de la banda de salida.

### 6.1 BANDEJAS DE CARGA

A partir del establecimiento de las dimensiones de las bandejas de carga se procede al diseño de la vagoneta; sin embargo, para efecto de facilitar la manipulación de las bandejas e incrementar su eficiencia; se les ha añadido un par de modificaciones con respecto al diseño de una bandeja básica que consiste en una plancha de hacer plana con paredes laterales, frontales y posteriores.

Cada bandeja tendrá un área de aproximadamente  $0.06 \text{ cm}^2$ , es decir, sus dimensiones serán 30 cm x 20 cm. Se eliminarán las paredes frontales y posteriores para permitir que el aire fluya a través del producto.

En la figura 6.1 se puede observar la distribución de dimensiones. Los lados laterales de la bandeja medirán 20 cm cada uno, mientras que los lados frontal y posterior 30 cm. Esta distribución tiene por objetivo incrementar la eficiencia del aire caliente que pasará sobre la superficie del producto.

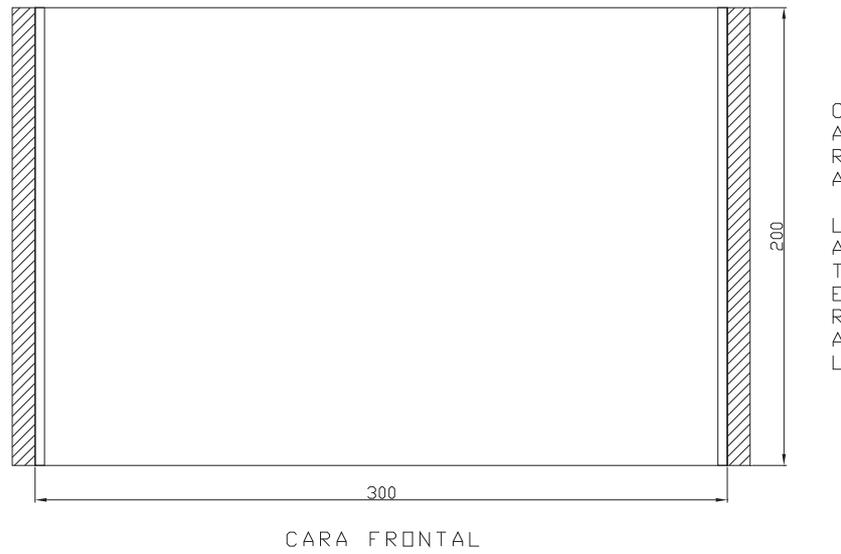


Fig 6.1

*Vista Superior de la Bandeja*

Diagrama generado con la ayuda de AutoCAD, se presenta la vista superior de la bandeja con sus respectivas dimensiones, las franjas resaltadas con líneas diagonales representan las pestañas que serán soldadas a las paredes de la bandeja.

Fuente: Daniela Villarroel Guevara.

Durante el proceso de secado, el aire caliente transportará consigo las moléculas de agua que ha logrado separar de la superficie húmeda del alimento. Es por esto que cuando el aire llegue a la entrada del túnel su humedad será mayor.

Otra de las modificaciones importantes fue la adición de un par de paredes, de 2.5 cm cada una en los lados laterales de la bandeja; esto facilitará la labor de colocar los recipientes dentro de la vagoneta. Asimismo, en los lados laterales

se soldarán dos pequeñas pestañas de 1 cm, éstas fungirán como soporte, ya que serán colocadas a manera de cajones dentro de un armario. Se consideró la colocación de ruedas sobre las pestañas para facilitar el deslizamiento dentro de la vagoneta, pero esto incrementaría significativamente el espacio entre bandejas, lo cual resultaría perjudicial ya que disminuiría la eficiencia del aire si existiesen espacios libres entre bandejas, e incluso entre paredes, mayores a 2,5cms.<sup>34</sup> John W. Lund en su obra “Design of a small fruit dryer using geothermal energy” determina mediante experimentos prácticos que una distancia de 2.5 cms permite que el aire en régimen circule de manera eficiente entre bandeja y bandeja teniendo así el espacio suficientemente grande para que exista choque molecular (agua-aire) y lo suficientemente pequeño para que no exista desperdicio de aire caliente cuando el fluido atraviesa la bandeja sin que exista un choque molecular significativo con el producto.

En el Plano Mecánico 1.1 se puede observar la isometría de la bandeja de carga, la cual da una idea más clara de las modificaciones realizadas y del aspecto general de la misma.

## **6.2 VAGONETA DE CARGA**

La vagoneta de carga llevará consigo 5 bandejas. El espaciado entre cada bandeja será de 2,5 cm a partir del inicio de cada pestaña de sujeción. Las paredes laterales de la vagoneta estarán conformadas por acero inoxidable de 0,4 cm y tendrán pequeñas salientes correspondientes a las pestañas de las bandejas; estas salientes medirán 1,5 cm cada una, y estarán firmemente soldadas a la vagoneta.

---

<sup>34</sup> John W. Lund, “Design of a small fruit dryer using geothermal energy”, Geo-Heat Center, Oregon Institute of Technology.

La altura de cada pared será de 26 cm, y su profundidad de 20 cm. El ancho de la vagoneta corresponderá al la distancia de la cara frontal de la bandeja, es decir, 30 cm, más los 3 cm necesarios para las salientes.

El Plano Mecánico 1.2 despliega de una manera más precisa las dimensiones y distribuciones de la vagoneta vacía, mientras que en el Plano Mecánico 1.2.1 se puede observar cuál será el aspecto de la misma una vez que se haya cargado con los recipientes llenos de producto.

# 7

## CONTROL AUTOMÁTICO

El Control Automático tiene como función obtener un mejor manejo del deshidratador. Se instalarán cuatro sistemas de control dentro del secador, tres de los cuales estarán dentro del túnel de secado y un cuarto permitirá el encendido o apagado en la sección de descarga de aire.

Gracias a estos sistemas se puede ejercer un mejor control del proceso, sin que exista intervención humana que pueda ser potencialmente dañina para el producto final, y que además incremente el costo por mano de obra.

Cada sistema ha sido fabricado manualmente utilizando microcontroladores (PIC 16F628, PIC 16F877) y otros componentes eléctricos y electrónicos sencillos. Se han utilizado placas de baquelita agujereadas para poder realizar el cableado respectivo; se descarta el uso de placas impresas ya que estas ofrecen menor flexibilidad en caso de que sea necesario hacer algún cambio por mal funcionamiento u oportunidad de mejora.

El comportamiento de todos los sistemas ha sido previamente simulado gracias al programa PROTEUS, el cual permite detectar errores de ensamblaje y de programación que puedan existir en el diseño. Las listas de Detalle de Materiales también han sido generadas a partir de este programa.

De igual manera, la programación de los microcontroladores fue realizada en el paquete informático MicroCode Studio, el cual utiliza lenguaje Basic en una versión especial para uso en microcontroladores PIC.

Todos los sistemas de control serán alimentados por una fuente de computadora, la cual asegura el abastecimiento de energía hacia todas las placas y puntos de control.

Se debe recordar que los microcontroladores pueden recibir un voltaje de hasta 5V; valores mayores incapacitan al elemento dañándolo permanentemente. Es por esto que se colocarán reguladores de voltaje LM7805 los cuales aseguran la alimentación de energía para los PICS, y además evitan la sobrecarga de voltaje y corriente.

Los diagramas de componentes electrónicos y su respectiva distribución de pines pueden ser encontrados en el Anexo 4.4.

## **7.1 SISTEMA DE CONTROL #1: CONTROL BLOWER**

Este Sistema de Control se encuentra en la sección de Descarga de Flujo. Su tarea principal es la de controlar la alimentación de energía hacia el Blower.

Sin embargo, este sistema también tiene funciones secundarias entre las cuales se encuentran el despliegue de información en el Display LCD y la selección del producto que se desea deshidratar.

Este sistema de control está conformado, principalmente, por dos microcontroladores PIC16F628, uno de los cuales se encarga del encendido y apagado del Blower, además de enviar información al sistema que regula la velocidad de la banda de entrada, según la selección de producto que se haya realizado. El segundo microcontrolador, está directamente comunicado con el

PIC16F628 descrito anteriormente; su función es la de recibir órdenes y desplegarlas en el Display LCD, el cual también estará encargado de realizar una pequeña presentación sobre el tema de esta Tesis y su autora.

Los Anexos 2.8 y 2.9 ofrecen la programación completa de ambos microcontroladores. Asimismo, en los Anexos 3.1 y 3.1.1 se pueden observar la diagramación del circuito completo, incluyendo LCD y el Detalle de Materiales utilizados en la construcción de este sistema de control; esta lista ha sido generada automáticamente por el programa PROTEUS.

### **7.1.1 SELECCIÓN DE COMPONENTES: CONTROL BLOWER**

Debido a la sencillez de este sistema, la selección de los componentes no representa dificultad particular. Sin embargo, como en todo diseño y ensamblaje electrónico es necesario poner cuidado a cuales son los requerimientos de cada componente; esto evitará malos funcionamientos y, sobretodo, la destrucción de uno o más elementos debido a corto circuitos o capacidad inadecuada de los mismos.

*Relé:* Para la selección de este elemento se tuvo que considerar el consumo de corriente del Blower; el relé debe estar en capacidad de soportar hasta 2.5 amperios y, de preferencia, debe ser alimentado por una fuente regulable de 5V a 12V.

## **7.2 SISTEMA DE CONTROL #2: CONTROL DE TEMPERATURA SALIDA, BANCO DE RESISTENCIAS Y AUXILIAR**

Este sistema está conformado por un PIC16F877 y un PIC16F628. El primero es ideal para la implementación de sistemas de medición de temperatura, ya que tiene conversores análogos digitales, lo cual evita la fabricación o adaptación de estos A/D al circuito. Lamentablemente, estos integrados no vienen en tamaños más pequeños y su número de pines es excesivamente numeroso, lo cual hace que muchas veces sean subutilizados, como es el caso de este medidor de temperatura.

Debido a la distancia existente entre la salida del túnel, que es donde se colocará el medidor y el Panel de Control, no es posible realizar una conexión directa del PIC16F877 al Display LCD ya que se corre el riesgo de perder datos o no obtener una comunicación clara.

Es por esto que se utiliza otro microcontrolador, un PIC16F628, el cual estará encargado de comunicarse con el PIC16F877 y transmitir datos hacia el Display LCD. Esta adaptación hace que el sistema de lectura sea más eficiente, a pesar de que esto signifique dejar sin aplicación a aproximadamente el 77,5% de los pines del PIC16F877.

Este porcentaje de desperdicio sería mucho mayor si no existieran conexiones directas desde el microcontrolador hacia un par de relés, los mismos que tienen la función de controlar el encendido y apagado del banco de resistencias y la resistencia auxiliar. Asimismo, existen otras dos conexiones a relés, esta vez encargadas de iluminar pequeños focos indicadores.

De esta manera no se tendrá información solamente en el Display LCD sino que también se podrá saber si el sistema está en proceso de aumentar o disminuir su temperatura de acuerdo con el estado de estos indicadores.

La tarea de control del PIC16F877 no es sencilla; su labor no es solamente la de sensor la temperatura del túnel sino también controlarla. Este sistema está conformado por dos medidores de temperatura, uno de bulbo seco, y el otro del bulbo húmedo.

La función del sensor de bulbo seco será la de enviar información al microcontrolador, el cual a su vez, según la lectura recibida, procederá a encender o apagar la resistencia auxiliar, la cual permite que se controle la cantidad de calor que se está entregando al flujo.

En un inicio, cuando la temperatura del túnel es igual a la del ambiente, el sistema tendrá como labor entregar calor al secador, para lo cual procederá a encender el banco principal de resistencias. Esto se realizará solamente al iniciar el proceso de precalentamiento del túnel<sup>35</sup>. A partir de esto, el control de temperatura del secador será completamente automático.

Por otro lado, el sensor de bulbo húmedo, que no es más que un segundo medidor de bulbo seco con una pequeña cubierta húmeda, fungirá como instrumento secundario. Este entregará su lectura directamente al microcontrolador 16F877, el cual enviará la información al PIC 16F628 y a partir de éste se desplegará la temperatura de bulbo húmedo en el Display LCD. Manualmente y con la ayuda de cartas psicrométricas se podrá conocer cuál es la humedad reinante en ese punto de control del deshidratador.

---

<sup>35</sup> Ver Capítulo 4: Diseño Preliminar.

Nada de esto sería posible sin la presencia de un amplificador operacional; este incrementa la señal proveniente de los sensores y la transmite al microcontrolador, lo cual permite que la información sea precisa y confiable.

El Anexo 2.1 contiene la programación del PIC16F877, mientras que la correspondiente al PIC16F628 se encuentra en el Anexo 2.2.

Para ver el diagrama de circuitería y la lista de materiales, se deberá referir al Anexo 3.3.

### **7.2.1 SELECCIÓN DE COMPONENTES: CONTROL DE TEMPERATURA SALIDA, BANCO DE RESISTENCIAS Y AUXILIAR**

*Relé – Banco Resistencias:* Si se considera que el banco de resistencias consumirá un aproximado de 1800 W en una conexión directa a una fuente de 120V, entonces sabemos que la corriente que circula por las mismas es de aproximadamente 15 A. Por lo tanto, el relé encargado de alimentar al banco deberá soportar como mínimo 15 A.

*Relé – Resistencia Auxiliar:* De igual manera que con el banco de resistencias, se debe especificar cuál será el consumo de la resistencia auxiliar; así se puede determinar qué tipo de relé se debe utilizar. Haciendo una relación simple se puede deducir que el requerimiento de corriente de la resistencia será de 5 A. Por lo tanto, se recomienda la utilización de un relé que soporte más de 5 A.

*Resistencias:* Las resistencias serán conformadas manualmente utilizando hilo resistivo de Nicromo, el cual será moldeado de forma que adopte la

configuración geométrica de una resistencia de ducha. La conformación del banco y resistencia auxiliar será explicada con mayor amplitud en el Capítulo 8.

### **7.3 SISTEMA DE CONTROL #3: CONTROL MOTORES DE BANDA DE INGRESO Y SALIDA**

Como ya fue mencionado, se desea diseñar y construir un deshidratador que sea, en lo posible, completamente automatizado. Esta automatización no podía excluir al control de las bandas transportadoras.

Cada banda requerirá de su propio motor de corriente continua y su propio microcontrolador PIC16F628, sin embargo, ambos controles se referirán a un solo Display LCD.

A pesar de que la diagramación del circuito<sup>36</sup> y su programación<sup>37</sup> puedan parecer complicadas, ninguna de las dos ofrece un reto en particular. El manejo de cada motor se hará por medio de PWM. PWM se refiere al ancho de onda de señal eléctrica que se envía al motor, y que a su vez controla la velocidad del mismo.

Mientras más corta sea la onda mayor velocidad será manejada por el motor y viceversa. Este control de pulsaciones puede ser observado en el Anexo 2.8, referente a la programación para el microcontrolador del motor de la banda de entrada. Debido a que ésta trabajará en función del producto, es necesario establecer tiempos de residencia en el túnel. Conociendo la distancia del túnel y la velocidad del motor, se puede obtener el tiempo de secado. Sin embargo, esta es una ecuación con dos incógnitas, es por esto que el tiempo de secado se

---

<sup>36</sup> Ver Anexo 3.2.

<sup>37</sup> Ver Anexo 2.5, 2.6 y 2.7.

determinará experimentalmente. Esto se logrará por medio de la variación de las PWM<sup>38</sup>.

Una vez seleccionado el producto que se desea deshidratar, se pondrá en funcionamiento el motor, este será detenido únicamente cuando se corte la fuente de energía principal. Es necesario recordar que la información sobre el producto que se desea deshidratar no proviene del PIC que controla la velocidad del motor, sino de aquel destinado al encendido y apagador del Blower, por lo tanto, en el Display LCD, encargado del despliegue de acciones de los motores, no se presentará la selección del producto.

Por otro lado, el motor de la banda de salida mantendrá sus PWM constantes, y será activado únicamente cuando se envíe la respectiva señal eléctrica proveniente de un Limit Switch, encargado de señalar el momento en el que la vagoneta ha terminado su recorrido en la banda de entrada y se ha colocado correctamente en la banda de salida.

Una vez que la vagoneta esté en la puerta de salida, de tal manera que el operador solo tenga que halarla hacia el exterior, dejará de hacer presión sobre el Limit Switch y se cortará el paso de energía hacia el motor.

Las PWM del motor de banda de salida se configurarán con una frecuencia constante igual a 125 ciclos. Un pequeño cambio sucede en el motor de banda de entrada en el cual las PWM para naranja serán igualmente de 125 y para pimienta de 120. De acuerdo con los resultados de las pruebas de secado se realizarán variaciones de velocidad para cada producto, las mismas que serán explicadas en el Capítulo 9.

---

<sup>38</sup> Ver *Determinación de Tiempo de Secado*. Capítulo 9.

### **7.3.1 SELECCIÓN DE COMPONENTES: CONTROL DE MOTOR DE BANDA DE INGRESO Y SALIDA**

Como se puede observar, en la diagramación este es el sistema de control que utiliza una mayor cantidad de componentes. El detalle de los mismos puede ser encontrado en el Anexo 3.2.1.

Una vez más la selección específica de elementos se concentra en los relés, los cuales son escogidos conforme al consumo de amperaje de los motores, es decir aproximadamente 2 Amperios.

Por otro lado el Limit Switch para el control de final de carrera de la banda de salida será seleccionado para que funcione con un consumo de entre 5V a 12V, y que su señal de salida sea compatible con el microprocesador.

Este es el sistema que presenta una mayor cantidad de conexiones para comunicación PIC a PIC; es por esto que los cables encargados de la transferencia de datos deberán ser flexibles pero resistentes. Esto evitará que existan rupturas que provoquen mal funcionamiento y que sean difíciles de identificar.

Para asegurar la comunicación se elegirán cables configurados en forma de bus de datos; este tipo de elemento será utilizado para todos los sistemas que impliquen comunicaciones de PIC a PIC.

## **7.4 SISTEMA DE CONTROL #4: CONTROL DE TEMPERATURA ENTRADA**

Compuesto por dos medidores electrónicos, el objetivo de este sistema de control es el de sensar la temperatura existente en el túnel en el momento en que ingresa la vagoneta al mismo.

Es sistema está compuesto por un microcontrolador PIC16F877 con conversor análogo/digital. Contará con dos medidores de temperatura; al igual que el Sistema de Control #2, el sensor será de bulbo seco colocado al lado de otro sensor de bulbo húmedo.

Las lecturas serán transferidas a un segundo microcontrolador PIC16F628 y desplegadas en su respectivo Display LCD.

Las programaciones de ambos microcontroladores son sencillas y pueden ser vistas en los Anexos 2.3 y 2.4. De igual manera, la diagramación de circuitería y el detalle de elementos utilizados se encuentran en los Anexos 3.4 y 3.4.4

Por ser este un sistema de control sencillo que está encargado únicamente de la medición de temperatura no tiene elementos que deban ser seleccionados de manera específica.

# 8

## PROCESO DE CONSTRUCCIÓN

El diseño preliminar y los cálculos básicos del proceso de secado permiten llegar al proceso de construcción conociendo cuales son los requerimientos y restricciones a los que la máquina estará sujeta. Al ser este un prototipo de deshidratador, se considerará la información obtenida en los Capítulos 4 y 5 como referencial y, en el mayor grado posible, la selección de materiales, equipos y dimensionamiento estarán sujetos a estos parámetros, sin embargo, esto irá en concordancia con su disponibilidad comercial.

El proceso de construcción del prototipo se realizó en dos fases, las cuales se llevaron a cabo simultáneamente. La primera fase constituyó la construcción mecánica de la estructura de soporte del prototipo, así como la colocación de rodillos, transición, bandeja base, bandeja para alojamiento de control, placas deflectoras, motor y Blower. Por otro lado, la segunda fase tuvo referencia a la construcción de placas electrónicas que estarán encargadas del control automático.

Los procesos mecánicos de la construcción fueron delegados al Sr. Augusto Ayala, Técnico Mecánico que se encargó de los procesos de corte, suelda y formado. Este trabajo fue realizado bajo constante supervisión y revisión de las características establecidas en el Diseño.

La conformación de las placas electrónicas fue realizada por la autora de la tesis, ya que el recurrir a terceros para este proceso representaría un costo adicional bastante elevado, llegando a costar cada placa cerca de 60 USD, sin considerar el valor de los elementos.

## 8.1 FASE MECÁNICA

Para este proceso fue necesario seleccionar materiales que sean resistentes a la corrosión y que sean considerados aptos para el trabajo con alimentos.

El acero inoxidable fue el material de elección debido a sus características de resistencia, fácil accesibilidad comercial y flexibilidad al momento de trabajo. Las características dimensionales del acero fueron determinadas según la parte del prototipo a ser construida.

El prototipo de Deshidratador de Túnel Contracorriente está conformado por una estructura que funciona, a la vez, como mesa de soporte para equipos y como residencia para los rodillos que constituyen las bandas de entrada y salida.

Las máquinas y herramientas que fueron utilizadas en este proceso son las siguientes:

- Torno.
- Dobladora de tol.
- Cortadora para acero inoxidable.
- Taladro de banco.
- Taladro manual.
- Esmeril.
- Tijeras de Tol.
- Sierra manual.
- Suelda de arco eléctrico.
- Prensa manual.
- Elementos de medición.

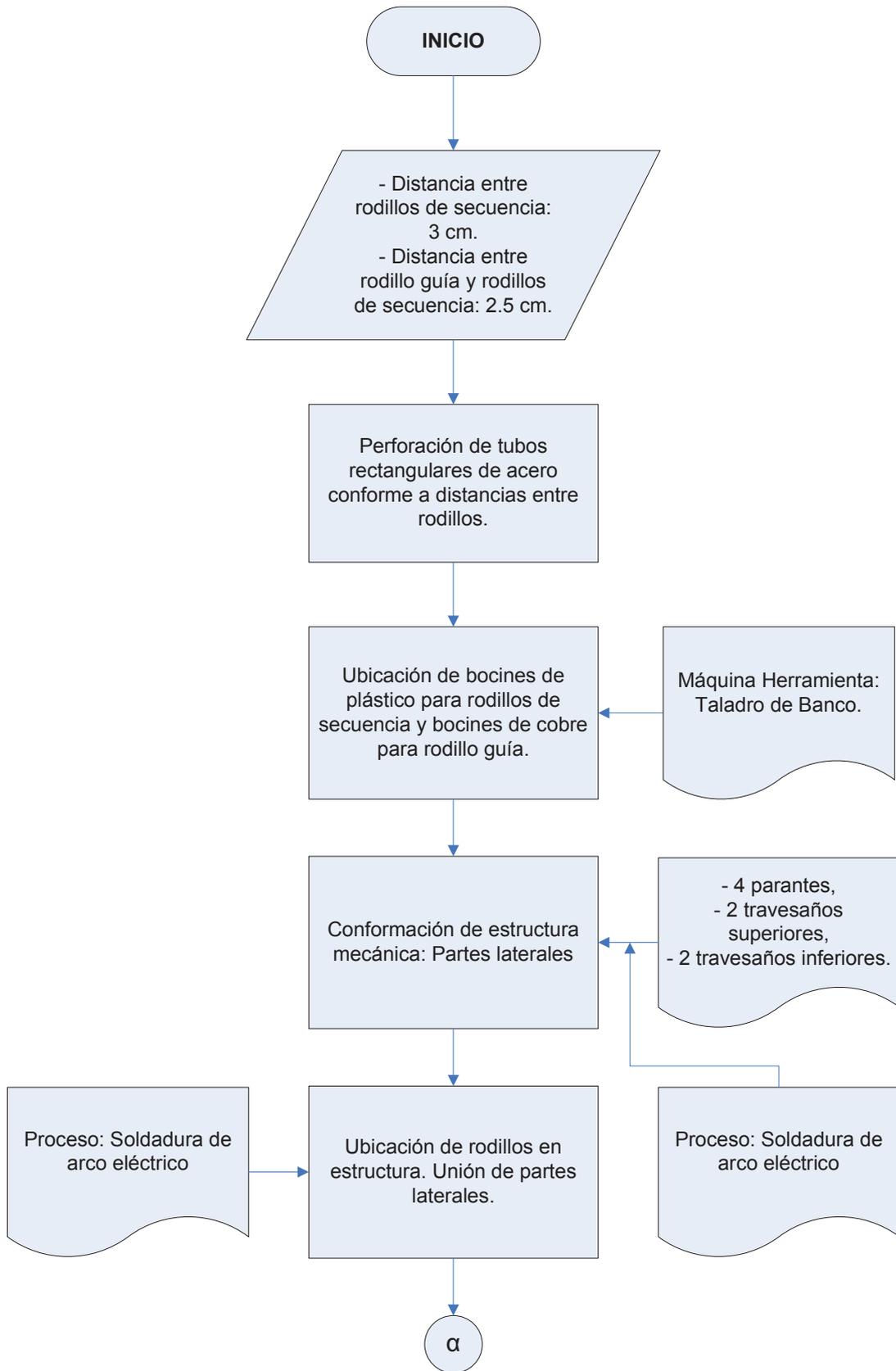
### 8.1.1 MATERIALES PARA CONSTRUCCIÓN MECÁNICA

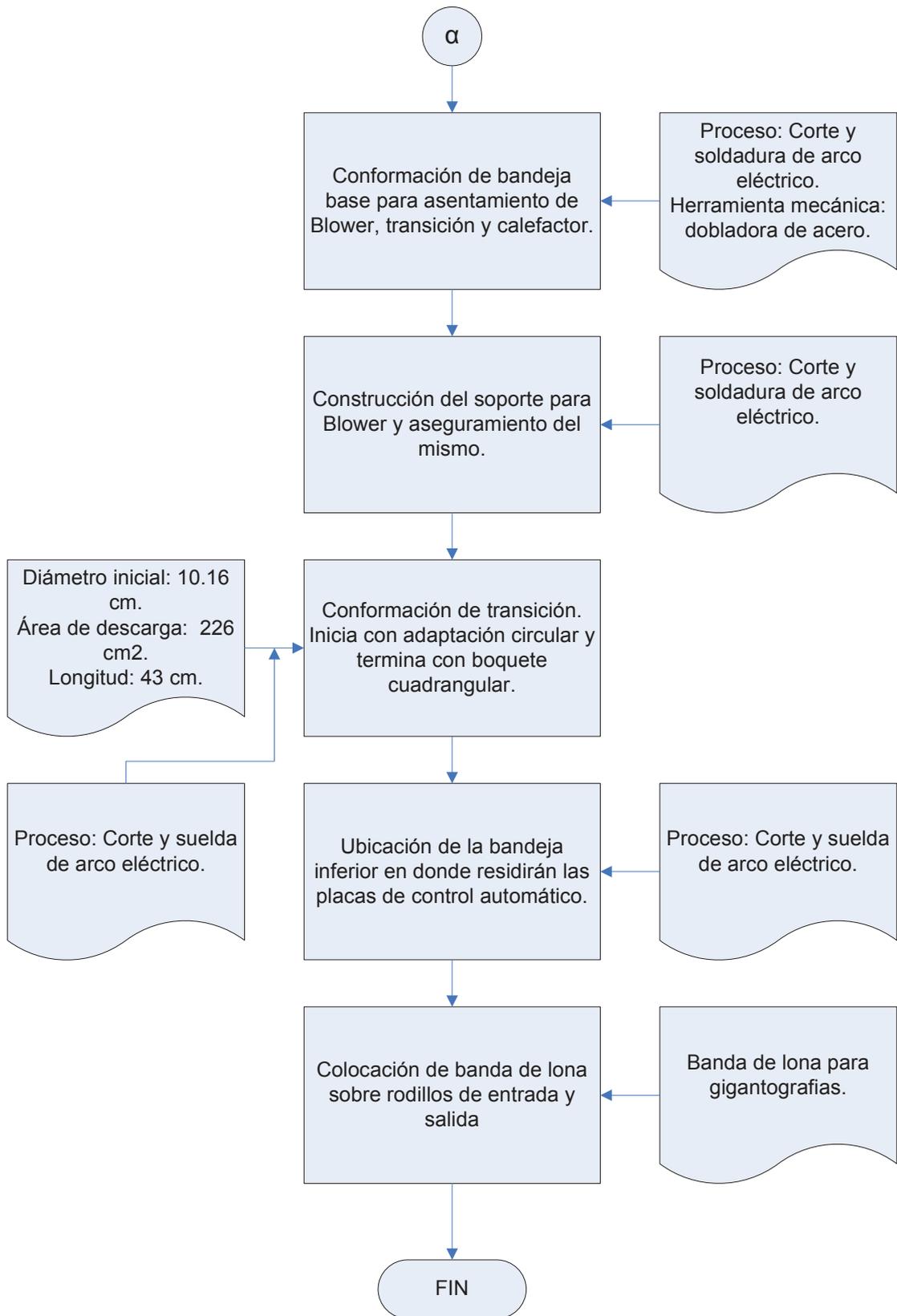
A continuación se detalla un listado de materiales que fueron necesarios para la construcción de la estructura de soporte, transición, placas deflectoras, mesas y marcos.

ELEMENTO	MATERIAL
Estructura de soporte	Tubo rectangular 2x1x1.5. Acero inoxidable.
Bandeja base	Plancha de acero galvanizado de 2.5mm.
Bandeja para alojamiento de control	Plancha de acero galvanizado de 2.5mm.
Transición	Plancha de acero galvanizado de 2.5mm.
Placas deflectoras	Plancha de acero galvanizado de 2.5mm.
Sujeción eje	Bocines de cobre. Diámetro interno: 10mm.
Sujeción de rodillos	Bocines de plástico. Diámetro externo: 10mm.
Eje macizo, banda de entrada	Acero de transmisión. Diámetro: 40mm.
Rodillos	Platina y rodamientos internos no visibles.
Sujeción Blower	Pernos de ¼ de pulgada de diámetro por 2 ½ de largo. Rosca gruesa, arandela plana y arandela presión.
Techo, paredes y puertas de Túnel	Acrílico transparente de 5mm. Bisagras con seguro para puertas de túnel.
Marcos	Tubo rectangular 2x1x1. Acero inoxidable.
Sujeción Calentador	Pernos de ¼ de pulgada de diámetro por 2 ½ de largo. Rosca gruesa, arandela plana y arandela presión.

### 8.1.2 SECUENCIA DE CONSTRUCCIÓN

Debido a que los procesos de conformado, mecánica y máquinas herramientas son aspectos que en la carrera de Ingeniería de Producción no son estudiados a profundidad, no se podrá relatar detalladamente la secuencia de construcción de la fase mecánica, ya que esta fue entregada a manos de un Técnico Mecánico capacitado para llevar a cabo este proceso. Sin embargo, a continuación, se presenta esquemáticamente las partes en las que se realizó la construcción de esta fase.





Una vez realizado este proceso se trasladó el prototipo hacia el taller de electrónica donde se colocaron las placas de control automático y se distribuyó el cableado a lo largo de la estructura tratando de evitar, en lo posible, la visibilidad de los mismos. En este mismo lugar se colocó el calefactor ya que este forma parte del sistema de control de temperatura.

Ya instalados y probados los sistemas de control se procedió a conformar el túnel, utilizando planchas de acrílico de 5mm, los cuales fueron sujetos a los marcos mediante pernos y aislados con silicona fría.

En el Anexo 5 se presentan fotografías del proceso de construcción mecánica, electrónica y del resultado final de la construcción conjunta.

Para la descarga de aire se optó inicialmente por una manejadora rectangular que entregara 500CFM pero debido a su costo se decidió adquirir un Blower común que entrega el mismo caudal de aire a 1.3 m/s. Una de las ventajas de esta selección radica en la posibilidad que presenta el Blower para controlar el flujo de aire que será entregado; esto es posible gracias a una pequeña persiana colocada en la etapa de succión del soplador, la cual permite regular la alimentación del aire. Durante las pruebas de secado se determinará la abertura óptima a la cual se deberá mantener la etapa de succión, dependiendo del tipo de alimento que se desee deshidratar. En el Manual de Operación se señalarán las posiciones adecuadas para el proceso.

La apariencia de la estructura mecánica, considerando la transparencia del túnel, será la siguiente:

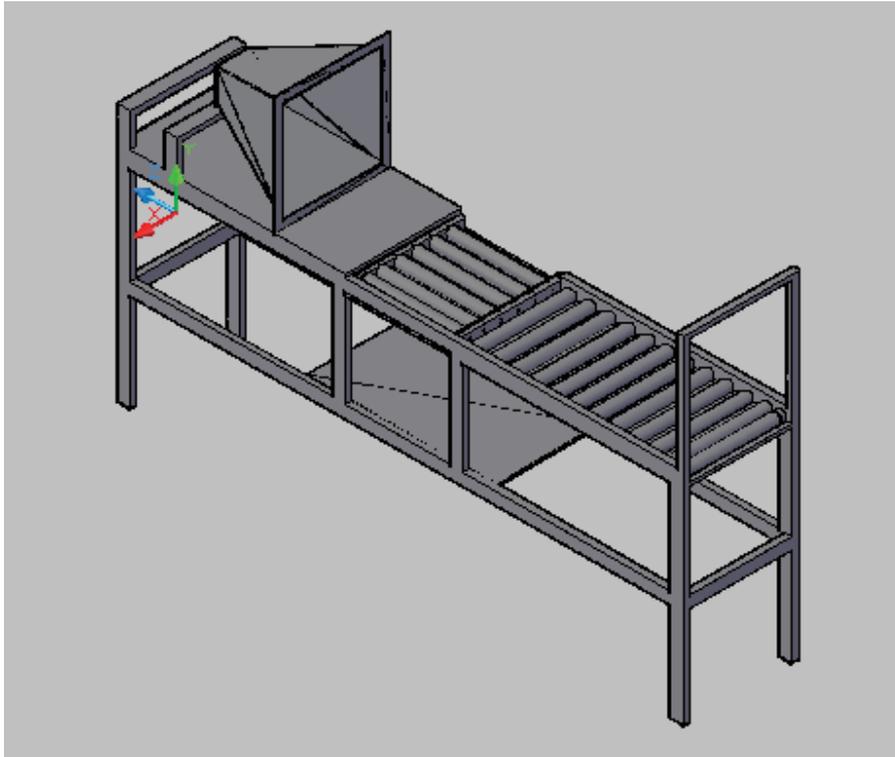


Fig. 8.1

*Bosquejo de estructura mecánica*

*En la figura se puede observar la apariencia que tendrá la estructura mecánica del prototipo sin considerar, blower, paredes laterales y superior del túnel, puertas de entrada y salida y bandas de transporte.*

Autora: Daniela Villarroel Guevara.

## 8.2 FASE ELECTRÓNICA

La construcción de placas electrónicas para control automático representó un alto costo no solamente en términos económicos sino que también requirieron tiempo y dedicación duplicados.

El valor económico de estos sistemas de control equivale aproximadamente al 45% del costo total del prototipo. A pesar de esto, la inclusión de un sistema de control operado completamente desde un panel representa una gran innovación que, sin lugar a dudas, incrementará el valor del producto final.

Las placas de control se construyeron de la forma más didáctica posible, dejando a la vista conexiones y elementos, con el fin de que los estudiantes que trabajarán con el prototipo puedan observar el funcionamiento y principios electrónicos que rigen estas placas de control.

Debido a la poca flexibilidad que tienen los cables comunes de conexión electrónica, se realizó una sustitución por cables tipo BUS, los cuales son altamente resistentes, maleables y soportan altos esfuerzos.

Una sola fuente de 12 Voltios y máximo 5 Amperios alimenta a todos los microcontroladores, motor y relés de las placas. Mientras que para la conexión de resistencias y Blower se utilizará una fuente común de 120V.

Las herramientas necesarias para la construcción de esta fase fueron las siguientes:

- Multímetro con medición de continuidad,
- Cautín a 60W,
- Pinzas tipo aguja,
- Cortadora de cable común,
- Cortadora de cable transversal,
- Pinzas de sujeción,
- Peladora de cables.

Para este proceso también se utilizaron herramientas virtuales extremadamente valiosas como son el programa de diseño PROTEUS y el paquete informático MicroCode Studio, para programación en lenguaje BASIC con su respectivo compilador PicBasicPro y programador WinPicPro.

## 8.2.1 MATERIALES PARA CONSTRUCCIÓN ELECTRÓNICA

A pesar de que no son muy variados los elementos electrónicos a utilizar si son numerosos. A continuación se describen los materiales básicos que se utilizaron para la construcción de los sistemas de control.

Tabla 8.2
DETALLE DE MATERIALES
Microcontroladores PIC 16F628A
Microcontroladores PIC 16F877A
Reguladores LM7805
Transistores 2N3904
Diodos 1N4007
Transistor darlington TIPP 220
Resistencias 4.7 KOhmios.
Resistencias 10 Kohmios
Resistores 10 Kohmios
Resistores 20 Kohmios
Displays LCD 2x16
Relés 5V, 5ª
Hilo de Niquelina 5.8 Ohmios
Motoreductor DC. 12V.
Fuente regulable de 3V a 12V, 5A.
Focos neón 120V
Selectores On/Off
Sensores de temperatura LM35
Amplificadores operacionales LM358
Cable Bus
Estaño
Baquelita 5cms x 5cms
Baquelita 5cms x 5cms
Zócalos de 8, 18 y 40 pines

## 8.2.2 SECUENCIA DE CONSTRUCCIÓN

Todas las placas fueron sometidas al siguiente proceso:

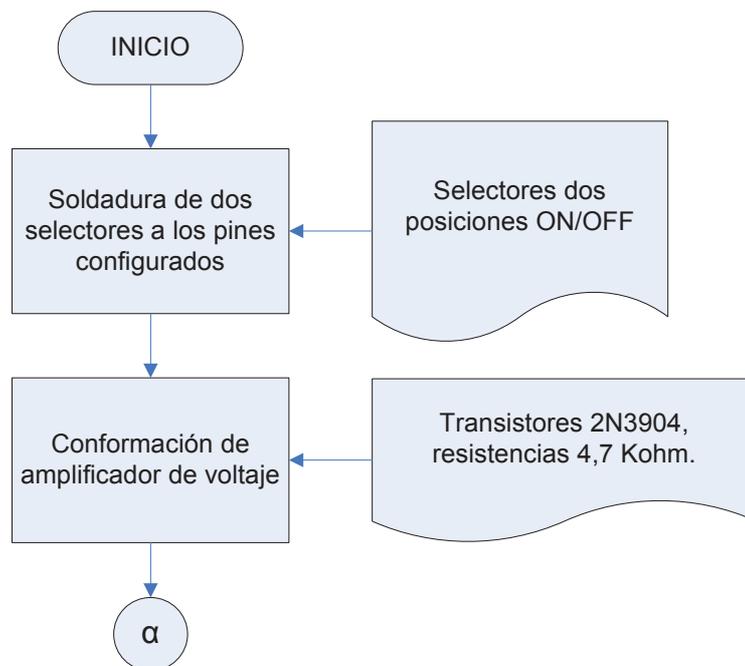
- Establecimiento de líneas de tierra y VCC (alimentación a 5 Voltios),
- Colocación de reguladores LM7805 y posterior suelda con líneas de tierra y VCC,

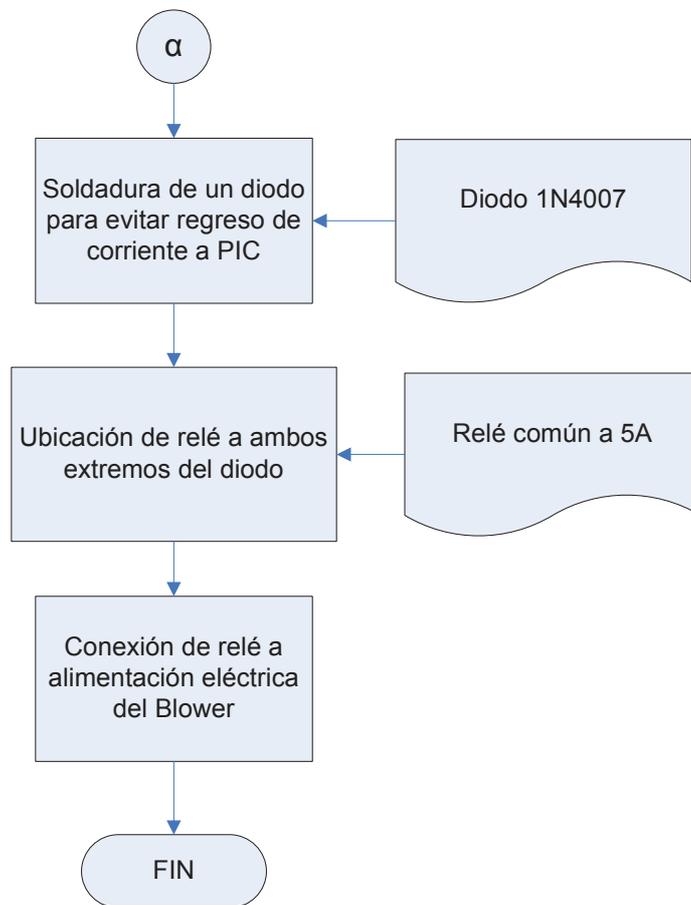
- Soldadura de zócalos y polarización (soldadura de pines correspondientes a tierra y VCC),
- Ubicación de cristales osciladores y capacitares en pines correspondientes a cada microcontrolador (15 y 16 para PIC16F628; 13 y 14 para PIC16F877).

El Anexo 3 entrega los diagramas de circuitería y programación para microcontroladores. Un estudio de este anexo facilitará la comprensión del proceso de construcción de las placas de control; este apartado contribuye a la comprensión de los pasos que se siguieron para el ensamblaje de estos sistemas.

Los procesos individuales por sistema de control son los siguientes:

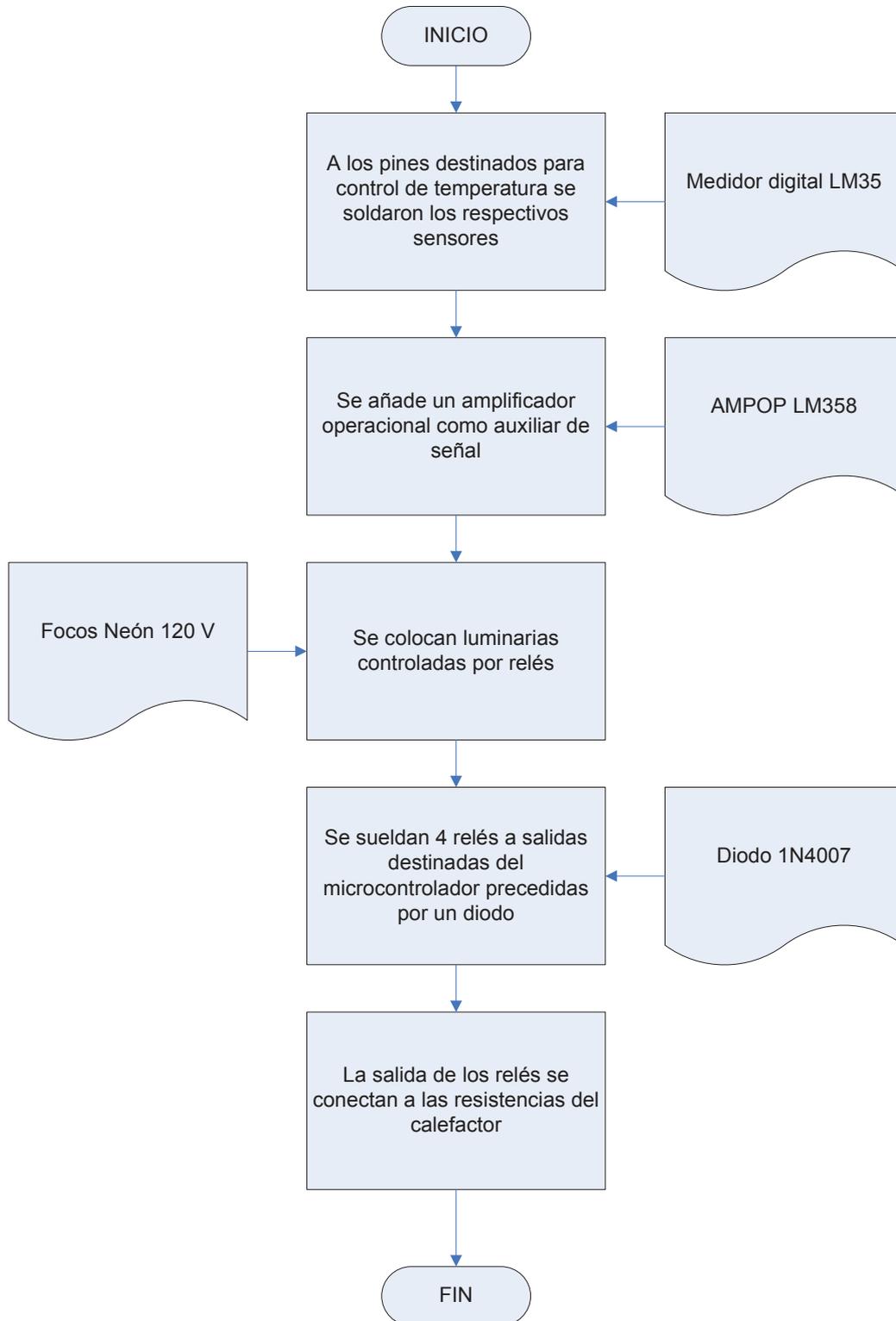
*Sistema de Control #1: Control Blower.*





El sistema de control del Blower tiene conexión directa con el control de la banda de entrada, la transferencia de datos produce que el motor regule su velocidad, enviando una señal eléctrica que encenderá las luces de neón para indicar en qué etapa de secado se encuentra la vagoneta.

*Sistema de Control #2: Control de Temperatura de Salida, Banco de Resistencias y Auxiliar.*

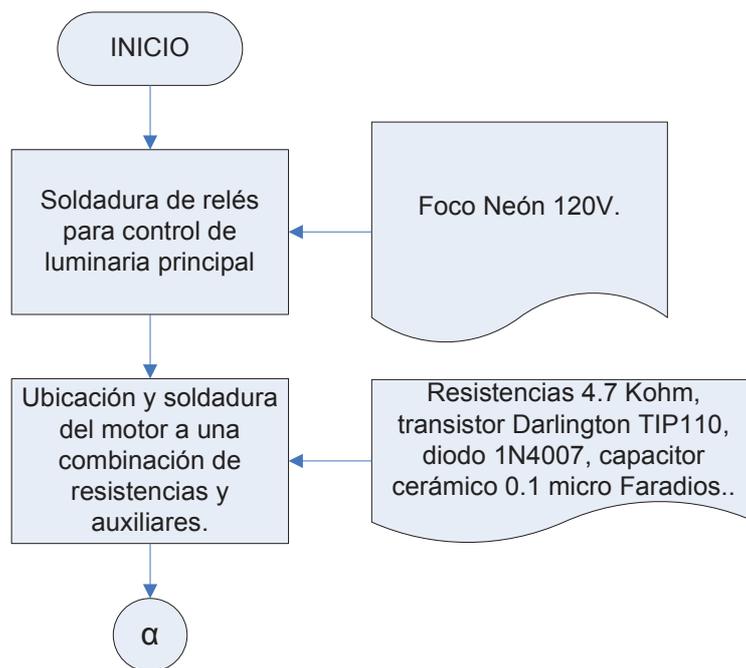


### *Sistema de Control #3: Control Motores Banda de Ingreso y Salida.*

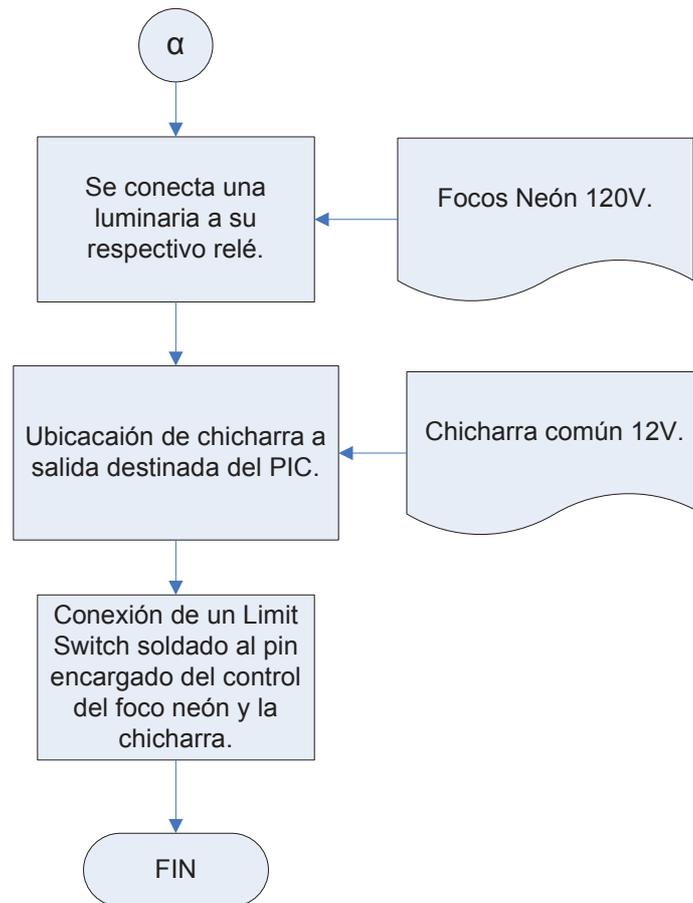
Debido a la presencia de la estructura de soporte no se consideró apropiada la implementación de un sistema de control para la salida del túnel, ya que el manejo de un motor continuo podría provocar la caída de la carga y posterior pérdida del producto deshidratado. Para compensar la ausencia de este sistema se colocaron manillas a los lados de la vagoneta, por lo tanto el producto saldrá del túnel manualmente.

Sin embargo, al final del túnel se colocó un Limit Switch que indicará, por medio de una luz de neón y una pequeña alarma, que la vagoneta ya debe ser retirada.

El control del motor de banda de entrada no sufrió alteraciones y el proceso de construcción fue el siguiente:



La placa encargada de anunciar que el producto está listo siguió el siguiente proceso:



#### *Sistema de Control #4: Control Temperatura de Salida*

Este sistema fue construido de la misma manera que el Control de Temperatura de Entrada, Banco de Resistencias y Auxiliar; la única diferencia entre ambos comandos radica en que el último no posee conexiones a relés ya que no maneja ningún tipo de equipo de calefacción o descarga de aire.

*Displays LCD:*

Es necesario tomar en cuenta que todos los sistemas de control están acompañados de un Display LCD encargado de plasmar las actividades del prototipo.

El ensamblaje de este elemento incluye la colocación de un resistor de 10 KOhmios para controlar el contraste de la pantalla y la soldadura de los pines del Display con los del microcontrolador.

# 9

## PRUEBAS DE SECADO

El objetivo principal de las Pruebas de Secado es evaluar el funcionamiento real del prototipo, su comportamiento durante el proceso y el tiempo de secado. Para desarrollar la evaluación se plantea el diseño  $3^2$  (dos variables con tres niveles cada una); por lo cual se realizaron 8 corridas, durante estos ensayos se recogieron muestras, indistintamente, para realizar mediciones de las mismas.

Cada "batch" fue previamente pesado y medido, por muestreo, con la ayuda de un calibrador Vernier y una balanza de presión con capacidad de 5Kg y gradientes de 25g. Se realizó el tratamiento previo establecido, y se colocaron las muestras en un colador, durante una hora, para que se elimine el exceso de agua absorbido durante el escaldado.

Se eligió a la naranja para estas pruebas, ya que su contenido de agua y superficie de secado son mayores a las del pimiento.

### 9.1 GENERALIDADES DEL COMPORTAMIENTO DEL PROTOTIPO DURANTE PRUEBAS DE SECADO

Previo a las pruebas de secado se realizó un ensayo preliminar en el cual se pudieron observar y corregir comportamientos anómalos que se presentaron en el prototipo.

Entre estos comportamientos se encontraron debilidades estructurales del túnel de secado ya que al llegar el calefactor a los 35°C, temperatura menor a la establecida como ideal para el proceso, el panel superior sufrió pequeñas deformaciones las cuales fueron controladas por medio de la ubicación de un corte de acrílico que permita aislar al techo del prototipo.

De igual manera, mientras se hicieron pruebas de calefacción con el Blower apagado, los paneles laterales tuvieron una pequeña tendencia a la cadencia debido al calor reinante en el prototipo, este fenómeno fue corregido por medio de la sujeción de los paneles laterales a la estructura de soporte con pernos, tuercas y arandelas de 1/2 x 2 pulgadas.

Por otro lado, el calefactor también sufrió algunos desperfectos durante la prueba preliminar; entre estos se pueden mencionar: la unión de las resistencias de diferentes conexiones, lo cual provocó corto circuitos y la posterior fundición y rompimiento de los puntos de contacto, la base que soporta el calefactor sufrió desprendimientos debido al calor y el movimiento interno del viento provocó que el elemento salga despedido de su base de sujeción.

Estos desperfectos fueron exitosamente controlados por medio de la limitación de desplazamiento de las resistencias y el uso de pegamentos más fuertes para la sujeción del calefactor.

El motor encargado del transporte de la banda a lo largo del túnel experimentó fallas de funcionamiento, como recalentamiento o apagado total, al disminuir su alimentación a 6V, como consecuencia del peso de la vagoneta. Lamentablemente la velocidad del motor hizo que el producto sea transportado de forma rápida hacia la banda de salida lo cual anuló el efecto contracorriente esperado en el prototipo.

## **9.2 ASPECTOS POSITIVOS DEL PROTOTIPO DURANTE LAS PRUEBAS DE SECADO**

Entre los aspectos positivos del comportamiento del prototipo durante las pruebas de secado se puede mencionar la reducción del consumo eléctrico esperado en el prototipo. Durante la prueba preeliminar se realizaron nuevas mediciones a la temperatura entregada por las resistencias, la misma que llegó hasta 50°C por resistencia, lo que reduce el consumo de electricidad en, aproximadamente, un 50%.

Gracias a la utilización de termómetros de bulbo húmedo se pudo comprobar la disminución continua de la humedad dentro del prototipo durante el proceso.

También fue posible observar experimentalmente el fenómeno de transferencia de calor, ya que durante las pruebas preliminares se concedieron pausas al Blower (de aproximadamente 2 minutos); durante este tiempo las resistencias permanecieron encendidas y la temperatura observada en los termómetros de bulbo seco empezó a decaer. Sin embargo, al momento de encender nuevamente el Blower la lectura de los termómetros incrementó de forma rápida demostrando que el calor puede ser transferido utilizando un medio de transporte como el aire.

La temperatura de secado durante del proceso fue de aproximadamente 45°C, 5°C por debajo de la temperatura establecida como óptima. A pesar de esto la deshidratación se llevó a cabo exitosamente llegando a obtener humedades finales entre 13% y 17%.

Como fue previsto, el conformar el túnel con un material transparente hizo posible observar todo el proceso así como los cambios morfológicos de la fruta.

## 9.3 DETERMINACIÓN DE VARIABLES Y RESULTADOS OBTENIDOS EN LAS PRUEBAS.

### 9.3.1 DETERMINACIÓN DE VARIABLES

Se asumieron tres variables, cada una con dos niveles, para realizar el estudio. Las variables identificadas fueron la temperatura, el tiempo y la carga másica total a deshidratar. El análisis entregó como resultado el número óptimo de pruebas a ser realizadas. Los datos obtenidos se tabularon de acuerdo con las variables y sus niveles.

Variable	Niveles
Temperatura	14°C-15°C 17°C-19°C
Tiempo	3 Horas 4. 5 Horas
Carga Másica	2 Kg 2.5 Kg

#### *Temperatura:*

Gracias a pruebas prácticas se han encontrado dos rangos de temperatura de bulbo seco las cuales van desde 14°C hasta 19°C, lecturas obtenidas a horas de la madrugada y mediodía, respectivamente.

Estas lecturas corresponden a la medición de los niveles de humedad relativa (72% y 80%, respectivamente), utilizando termómetros de bulbo húmedo con el prototipo apagado.

### *Tiempo:*

Se impuso que el tiempo máximo de secado sería igual a 4.5 horas. Durante las pruebas de secado se observó que a partir de las 3 horas de proceso los termómetros de bulbo húmedo raramente registraban una variación manteniéndose, en casi todos los casos, estables durante el tiempo restante de proceso.

### *Carga Másica:*

Utilizando muestras de producto con una geometría de corte de 5mm a 7mm, la vagoneta tiene una capacidad de carga de entre 2 lb y 2.7 lb, se definirán como variables a cargas que se encuentren entre los rangos de 2 lb y 2.5 lb. La capacidad de carga puede incrementarse proporcionalmente con la geometría de corte, sin embargo este cambio produciría un proceso ineficiente.

## **9.3.2 RESULTADOS OBTENIDOS EN LAS PRUEBAS**

Los parámetros bajo los cuales se realizaron las corridas son los siguientes:

Tabla 9.2  
**Tabla de parámetros de corridas.**

<b># de Corrida</b>	<b>Temp. [°C]</b>	<b>Tiempo [Horas]</b>	<b>Carga [Lbs]</b>
<b>1</b>	14-15	3	2
<b>2</b>	14-15	4.5	2
<b>3</b>	14-15	3	2.5
<b>4</b>	14-15	4.5	2.5

Tabla 9.2 (cont...)  
**Tabla de parámetros de corridas.**

# de Corrida	Temp. [°C]	Tiempo [Horas]	Carga [Lbs]
5	Temp. [°C]	Tiempo [Horas]	Carga [Lbs]
6	17-19	3	2
7	17-19	4.5	2
8	17-19	3	2.5

Corrida #1:

Tabla 9.3  
**Peso Registrado en la Vagoneta**

Bandeja #	Peso (lb)
1	0.21
2	0.23
3	0.26
4	0.22
5	0.20
6	0.17
7	0.24
8	0.20
9	0.32
10	0.24
<b>TOTAL CARGA:</b>	<b>2.29 Lb</b>

Se tomaron aleatoriamente diez muestras de producto (una de cada bandeja), las cuales presentaron una geometría de corte con un grosor promedio de 5mm

Tabla 9.4  
**Bitácora de Proceso**

Tiempo elapsado	TBS1	TBS2	TBH1	TBH2	Observaciones
00:01 horas.	14°C	14°C	13°C	13°C	No se han encendido resistencias ni Blower. La prueba se realiza en horas de la madrugada.
00:15 horas	24°C	22°C	15°C	13°C	Se han encendido las resistencias. Blower en posición OFF. Se determina que el tiempo de medición será de cada 15 minutos hasta alcanzar los 35°C a partir de esto se apagará el Blower cada 15 minutos y se realizará la lectura cada 30 minutos. No se observan cambios en la fruta.
00:30 horas	26°C	25°C	16°C	15°C	Las lecturas de los termómetros sufren el efecto de la baja temperatura ambiental. Se apaga el Blower durante 2 minutos.

00:45 horas	28°C	28°C	17°C	15°C	Se apaga el Blower durante 2 minutos. No se observan cambios en la fruta.
01:00 horas	33°C	30°C	19°C	18°C	Se apaga del Blower durante 2 minutos.
01:15 horas	36°C	31.5°C	19°C	18°C	
01:45 horas	36°C	34°C	20°C	19.5°C	Se apaga el Blower durante 2 minutos. Se observan cambios en la apariencia de la fruta.
02:15 horas	40°C	37°C	22°C	21°C	
02:45 horas	40°C	38°C	22°C	21°C	Se apaga el Blower por 3 minutos.
03:15 horas	43°C	39°C	23°C	22°C	Se retira la vagoneta del túnel y se realiza pesaje del producto. Carga de producto final: 0.58Lbs.

Corrida #2:

Tabla 9.5 Peso Registrado en la Vagoneta		
Bandeja #	Peso (lb)	Se tomaron aleatoriamente diez muestras de producto (una de cada bandeja), las cuales presentaron una geometría de corte con un grosor promedio de 4.6mm
1	0.22	
2	0.20	
3	0.22	
4	0.21	
5	0.18	
6	0.20	
7	0.22	
8	0.17	
9	0.21	
10	0.20	
<b>TOTAL CARGA:</b>	<b>2.13 Lb</b>	

Tabla 9.6 Bitácora de Proceso					
Tiempo elapsado	TBS1	TBS2	TBH1	TBH2	Observaciones
00:01 horas.	15°C	15°C	14°C	14°C	No se han encendido resistencias ni Blower. La prueba se realiza en horas de la madrugada.
00:15 horas	23°C	22°C	14°C	14°C	Se han encendido las resistencias. Blower en posición OFF. Se determina que el tiempo de medición será de cada 15 minutos hasta alcanzar los 35°C a partir de esto se apagará el Blower cada 15 minutos y se realizará la lectura cada 30 minutos. No se observan cambios en la fruta.

00:30 horas	26°C	25°C	17°C	15°C	Se apaga el Blower durante 3 minutos.
00:45 horas	29°C	26°C	19°C	18°C	Se apaga el Blower durante 2 minutos. No se observan cambios en la fruta.
01:00 horas	33°C	30°C	19°C	18°C	Se apaga del Blower durante 2 minutos.
01:15 horas	37°C	35°C	22°C	20°C	
01:45 horas	37°C	35°C	22°C	20°C	Se apaga el Blower durante 2 minutos. Se observan cambios en la apariencia de la fruta.
02:15 horas	39°C	36°C	22.5°C	21°C	
02:45 horas	39°C	37°C	22.5°C	21°C	Se apaga el Blower por 3 minutos.
03:15 horas	42°C	40°C	23.5°C	22°C	Se apaga el Blower durante 2 minutos
03:45 horas	45°C	43°C	23.5°C	22°C	
04:15 horas	45°C	43°C	23.5°C	22.5°C	Se procede a apagar el Blower durante 2 minutos.
04:30 horas	46.5°C	45.5°C	25°C	23°C	Se procede a retirar la vagoneta y pesar el producto. Se registran 0.34 lbs.

*Corrida #3:*

Peso Registrado en la Vagoneta		
Bandeja #	Peso (lb)	Se tomaron aleatoriamente diez muestras de producto (una de cada bandeja), las cuales presentaron una geometría de corte con un grosor promedio de 6mm
1	0.26	
2	0.32	
3	0.26	
4	0.24	
5	0.18	
6	0.20	
7	0.29	
8	0.23	
9	0.30	
10	0.28	
<b>TOTAL CARGA:</b>	<b>2.56 Lb</b>	

Bitácora de Proceso					
Tiempo elapsado	TBS1	TBS2	TBH1	TBH2	Observaciones
00:01 horas.	15°C	15°C	13°C	13°C	No se han encendido resistencias ni Blower. La prueba se realiza en horas de la madrugada.
00:15 horas	25°C	22°C	14°C	13°C	Se han encendido las resistencias. Blower en posición OFF. Se determina que el tiempo de medición

					será de cada 15 minutos hasta alcanzar los 35°C a partir de esto se apagará el Blower cada 15 minutos y se realizará la lectura cada 30 minutos. No se observan cambios en la fruta.
00:30 horas	26°C	24°C	16°C	14°C	La baja temperatura que tiene el aire que alimenta al Blower tiene efecto en el calentamiento del túnel, las temperaturas medidas son inferiores a aquellas experimentadas en las pruebas anteriores durante el mismo lapso. Se apaga el Blower durante 3 minutos.
00:45 horas	29°C	26°C	19°C	18°C	Se apaga el Blower durante 2 minutos. No se observan cambios en la fruta.
01:00 horas	33°C	30°C	19°C	18°C	Se apaga del Blower durante 2 minutos.
01:15 horas	36°C	31.5°C	19°C	18°C	
01:45 horas	36°C	33°C	20.5°C	20°C	Se apaga el Blower durante 2 minutos. Se observan cambios en la apariencia de la fruta.
02:15 horas	39°C	37°C	20.5°C	20°C	La corteza adquiere un aspecto áspero, muestras más delgadas empiezan a perder sus uniones más delgadas.
02:45 horas	41°C	40°C	22°C	21°C	Se apaga el Blower por 3 minutos.
03:15 horas	44°C	42°C	23.5°C	22°C	Peso final de carga: 0.88Lbs

Corrida #4:

Peso Registrado en la Vagoneta		Se tomaron aleatoriamente diez muestras de producto (una de cada bandeja), las cuales presentaron una geometría de corte con un grosor promedio de 6mm
Bandeja #	Peso (lb)	
1	0.26	
2	0.32	
3	0.26	
4	0.24	
5	0.18	
6	0.20	
7	0.29	
8	0.23	
9	0.30	
10	0.28	
<b>TOTAL CARGA:</b>	<b>2.56 Lb</b>	

Tabla 9.10					
Bitácora de Proceso					
Tiempo elapsado	TBS1	TBS2	TBH1	TBH2	Observaciones
00:01 horas.	15 °C	15 °C	13 °C	13 °C	No se han encendido resistencias ni Blower. La prueba se realiza en horas de la madrugada.
00:15 horas	25 °C	22 °C	14 °C	13 °C	Se han encendido las resistencias. Blower en posición OFF. Se determina que el tiempo de medición será de cada 15 minutos hasta alcanzar los 35 °C a partir de esto se apagará el Blower cada 15 minutos y se realizará la lectura cada 30 minutos. No se observan cambios en la fruta.
00:30 horas	26 °C	24 °C	16 °C	14 °C	La baja temperatura que tiene el aire que alimenta al Blower tiene efecto en el calentamiento del túnel, las temperaturas medidas son inferiores a aquellas experimentadas en las pruebas anteriores durante el mismo lapso. Se apaga el Blower durante 3 minutos.
00:45 horas	29 °C	26 °C	19 °C	18 °C	Se apaga el Blower durante 2 minutos. No se observan cambios en la fruta.
01:00 horas	33 °C	30 °C	19 °C	18 °C	Se apaga del Blower durante 2 minutos.
01:15 horas	36 °C	31.5 °C	19 °C	18 °C	
01:45 horas	36 °C	33 °C	20.5 °C	20 °C	Se apaga el Blower durante 2 minutos. Se observan cambios en la apariencia de la fruta.
02:15 horas	39 °C	37 °C	20.5 °C	20 °C	La corteza adquiere un aspecto áspero, muestras más delgadas empiezan a perder sus uniones más delgadas.
02:45 horas	41 °C	40 °C	22 °C	21 °C	Se apaga el Blower por 3 minutos.
03:15 horas	44 °C	42 °C	23.5 °C	22 °C	Se experimenta un cambio rápido en las lecturas conforme la temperatura ambiente incrementa. Se apaga el Blower durante 2 minutos
03:45 horas	46 °C	44 °C	25 °C	22 °C	
04:15 horas	46 °C	43 °C	26 °C	22.5 °C	Se procede a apagar el Blower durante 2 minutos.
04:30 horas	47.5 °C	43.5 °C	26 °C	23 °C	Se procede a retirar la vagoneta y pesar el producto. Se registran 0.48 lbs.

Corrida #5:

Tabla 9.11		
Peso Registrado en la Vagoneta		
Bandeja #	Peso (lb)	Se tomaron aleatoriamente diez muestras de producto (una de cada bandeja), las cuales presentaron una geometría de corte con un grosor promedio de 5mm
1	0.20	
2	0.24	
3	0.24	
4	0.22	
5	0.20	
6	0.24	
7	0.21	
8	0.20	
9	0.25	
10	0.22	
<b>TOTAL CARGA:</b>	<b>2.22 Lb</b>	

Tabla 9.12					
Bitácora de Proceso					
Tiempo elapsado	TBS1	TBS2	TBH1	TBH2	Observaciones
00:01 horas.	18 °C	18 °C	17 °C	17 °C	No se han encendido resistencias ni Blower.
00:05 horas	23 °C	22 °C	18 °C	17 °C	Se han encendido las resistencias. Blower en posición OFF. Se presentan incrementos notables en la temperatura de bulbo seco y similitudes en las de bulbo húmedo. No se observan cambios en la fruta.
00:20 horas	27 °C	26 °C	19 °C	19 °C	Se enciende el Blower y se realiza una medición inmediata. No se observan cambios en la fruta.
00:21 horas	34 °C	32 °C	21 °C	19 °C	Se observa un incremento rápido en las temperaturas de bulbo seco. No se observan cambios en la fruta.
00:35 horas	34 °C	33 °C	21 °C	20 °C	No se observan cambios en la fruta. Se enciende el Blower
01:15 horas	41 °C	39 °C	23 °C	20.5 °C	Se empiezan a observar cambios en la fisonomía de la fruta.
01:45 horas	41 °C	39 °C	23 °C	20.5 °C	
02:00 horas	43 °C	42 °C	24 °C	21 °C	Se observan cambios lentos en la estructura de la fruta.
02:35 horas	43 °C	41 °C	24 °C	21.5 °C	Se estabilizan las lecturas de temperatura

					de bulbo húmedo.
02:50 horas	43 °C	41 °C	25 °C	22 °C	Se procede apagar el Blower durante 2 minutos para incrementar la temperatura.
02:51 horas	45 °C	43 °C	26 °C	22 °C	
03:00 horas	45 °C	43.5 °C	26 °C	23 °C	Peso final del producto: 0,52Lbs.

Corrida #6:

Tabla 9.13 Peso Registrado en la Vagoneta		
Bandeja #	Peso (lb)	Se tomaron aleatoriamente diez muestras de producto (una de cada bandeja), las cuales presentaron una geometría de corte con un grosor promedio de 4.5mm
1	0.18	
2	0.20	
3	0.26	
4	0.23	
5	0.25	
6	0.22	
7	0.23	
8	0.20	
9	0.26	
10	0.22	
<b>TOTAL CARGA:</b>	<b>2.25 Lb</b>	

Tabla 9.14 Bitácora de Proceso					
Tiempo elapsado	TBS1	TBS2	TBH1	TBH2	Observaciones
00:01 horas.	19 °C	19 °C	17 °C	17 °C	No se han encendido resistencias ni Blower. La prueba se realiza aproximadamente 1.5 horas después de la anterior lo cual influye en la temperatura del túnel.
00:15 horas	25 °C	23 °C	19 °C	18 °C	Se han encendido las resistencias. Blower en posición OFF. Se determina que el tiempo de medición será de cada 15 minutos hasta alcanzar los 35 °C a partir de esto se apagará el Blower cada 15 minutos y se realizará la lectura cada 30 minutos. No se observan cambios en la fruta.
00:30 horas	30 °C	29 °C	21 °C	19 °C	No se observan cambios en la fruta.
00:45 horas	35 °C	33 °C	21 °C	19 °C	Se apaga el Blower durante 2 minutos. No se observan cambios en la fruta.

01:15 horas	38 °C	35 °C	21.5 °C	20.5 °C	Se apaga el Blower durante 2 minutos.
01:45 horas	41 °C	40 °C	22.5 °C	21 °C	Hay cambios en la fisiología de la fruta los cuales fueron observados a partir de 1:20 minutos de proceso.
02:15 horas	41.5 °C	40 °C	22.5 °C	21.5 °C	Se apaga el Blower durante dos minutos
02:45 horas	41.5 °C	41 °C	22.5 °C	22 °C	Se apaga el Blower durante dos minutos, se estabiliza la lectura de TBH2.
03:15 horas	45.6 °C	45 °C	23.5 °C	22 °C	
03:45 horas	45.6 °C	45 °C	25.5 °C	24.5 °C	
04:15 horas	45.6 °C	45 °C	27 °C	24.5 °C	Se procede a apagar el Blower durante 2 minutos.
04:30 horas	45.6 °C	45 °C	27 °C	24.5 °C	No se observa incremento en la temperatura. Se procede a retirar la vagoneta y pesar el producto. Se registran 0.29 lbs.

*Corrida #7:*

Tabla 9.15 <b>Peso Registrado en la Vagoneta</b>		
<b>Bandeja #</b>	<b>Peso (lb)</b>	Se tomaron aleatoriamente diez muestras de producto (una de cada bandeja), las cuales presentaron una geometría de corte con un grosor promedio de 6.5mm
1	0.30	
2	0.25	
3	0.30	
4	0.25	
5	0.25	
6	0.20	
7	0.30	
8	0.27	
9	0.32	
10	0.20	
<b>TOTAL CARGA:</b>	<b>2.64 Lb</b>	

Tabla 9.16 <b>Bitácora de Proceso</b>					
<b>Tiempo elapsado</b>	<b>TBS1</b>	<b>TBS2</b>	<b>TBH1</b>	<b>TBH2</b>	<b>Observaciones</b>
00:01 horas.	19 °C	19 °C	17 °C	17 °C	No se han encendido resistencias ni Blower.
00:05 horas	25 °C	20 °C	18 °C	19 °C	Se han encendido las resistencias. Blower en posición OFF. Se presentan incrementos notables en la temperatura de bulbo seco y similitudes en las de bulbo húmedo. No se observan cambios en la fruta.

00:20 horas	35 °C	29 °C	21 °C	19 °C	Se enciende el Blower y se realiza una medición inmediata. No se observan cambios en la fruta.
00:21 horas	39 °C	34 °C	21 °C	19 °C	Se observa un incremento rápido en las temperaturas de bulbo seco, sin embargo en las de bulbo húmedo se mantienen las lecturas. No se observan cambios en la fruta.
00:35 horas	35 °C	34 °C	21 °C	20 °C	Se detiene el Blower durante dos minutos y se observa disminución en la lectura de los termómetros de bulbo seco. No se observan cambios en la fruta.
00:36 horas	38 °C	32 °C	21 °C	20 °C	Se enciende el Blower y se realiza una medición inmediata de los termómetros. No se observan cambios en la fruta.
01:15 horas	40.5 °C	38 °C	23 °C	21 °C	Se empiezan a observar cambios en la fisonomía de la fruta.
01:45 horas	40.5 °C	38 °C	24 °C	21.5 °C	Se estabiliza la temperatura a 40.5 °C, 9.5 °C menos a la establecida como óptima. Se procede a apagar el Blower durante 3 minutos. No se excede este lapso para evitar daños a los paneles de acrílico.
02:00 horas	43 °C	40 °C	26 °C	22 °C	Se observan cambios lentos en la estructura de la fruta.
02:35 horas	43 °C	41 °C	26 °C	22 °C	Se estabilizan las lecturas de temperatura de bulbo húmedo.
02:50 horas	43 °C	42 °C	26 °C	22.5 °C	Se procede a apagar el Blower durante 2 minutos para incrementar la temperatura.
02:51 horas	44.5 °C	43 °C	26 °C	22 °C	Peso registrado: 0,74Lbs.

*Corrida #8:*

Tabla 9.17		Se tomaron aleatoriamente diez muestras de producto (una de cada bandeja), las cuales presentaron una geometría de corte con un grosor promedio de 5mm
Peso Registrado en la Vagoneta		
Bandeja #	Peso (lb)	
1	0.26	
2	0.33	
3	0.27	
4	0.30	
5	0.30	
6	0.26	
7	0.20	
8	0.20	
9	0.23	
10	0.22	
<b>TOTAL CARGA:</b>	<b>2.57 Lb</b>	

Tabla 9.18					
Bitácora de Proceso					
Tiempo elapsado	TBS1	TBS2	TBH1	TBH2	Observaciones
00:01 horas.	19°C	19°C	17°C	17°C	No se han encendido resistencias ni Blower. La prueba se realiza aproximadamente 1.5 horas después de la anterior lo cual influye en la temperatura del túnel.
00:15 horas	26.5°C	25°C	20°C	19°C	Se han encendido las resistencias. Blower en posición OFF. Se determina que el tiempo de medición será de cada 15 minutos hasta alcanzar los 35°C a partir de esto se apagará el Blower cada 15 minutos y se realizará la lectura cada 30 minutos. No se observan cambios en la fruta.
00:30 horas	30.5°C	28°C	22°C	20°C	No se observan cambios en la fruta.
00:45 horas	30.5°C	29°C	22°C	20°C	Se apaga el Blower durante 2 minutos. No se observan cambios en la fruta.
01:00 horas	34°C	31°C	22.5°C	20.5°C	Se apaga el Blower durante 2 minutos.
01:15 horas	36°C	34°C	22.5°C	21°C	Se observan cambios en la fruta. Se apaga Blower durante 3 minutos.
01:45 horas	40.5°C	39°C	23.5°C	22°C	Se apaga el Blower durante 3 minutos.
02:15 horas	44.5°C	43°C	25°C	23°C	
02:45 horas	44.5°C	43°C	25°C	23°C	Se apaga el Blower durante 2 minutos.
03:15 horas	45.5°C	44.5°C	26°C	25°C	
03:45 horas	45.5°C	44.5°C	26°C	25°C	Se estabilizan temperaturas de bulbo seco y húmedo.
04:15 horas	45.5°C	44.5°C	26°C	25°C	Se procede a apagar el Blower durante 2 minutos.
04:30 horas	46°C	44°C	26°C	23°C	Se procede a retirar la vagoneta y pesar el producto. Se registran 0.41 lbs.

## 9.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados fueron tabulados con el fin de facilitar el análisis de los mismos y llegar a conclusiones relevantes sobre el funcionamiento del prototipo y el proceso de deshidratación.

Tabla 9.19

Análisis de Resultados								
# Prueba	Condiciones			Peso I. [Lbs]	Peso F. [Lbs]	$\Delta$ Humedad [Lbs]	% a Deshidratar	% Deshidratado
	T [°C]	C [Lbs]	t [Hr]					
1	14-15	2.5	3	2,56	0,88	1,68	34,38	65,62
2	14-15	2.5	4.5	2,56	0,48	2,08	18,75	81,25
3	14-15	2	3	2,29	0,58	1,71	24,33	75,67
4	14-15	2	4.5	2,13	0,34	1,79	15,96	84,04
5	17-19	2.5	3	2,64	0,74	1,90	28,03	71,97
6	17-19	2.5	4.5	2,57	0,41	2,16	15,95	84,05
7	17-19	2	3	2,22	0,52	1,70	23,42	76,58
8	17-19	2	4.5	2,25	0,29	1,96	12,88	87,12

Tabla 9.20

**Porcentajes de humedad presente en el producto final según la temperatura y tiempo al que estuvieron sometidos al proceso**

Condiciones			% humedad a deshidratar
Temperatura [°C]	Tiempo [Hr]	Carga [Lbs]	
17 – 19	4,5	2 – 2,5	14,56
14 – 15	4,5	2 – 2,5	17,48
17 – 19	3	2 – 2,5	25,73
14 – 15	3	2 – 2,5	29,86

La Tabla 9.20 presenta un resumen en el que se establecen, en orden ascendente, los promedios de humedad encontrados en las 8 pruebas de deshidratación. En base a esta Tabla 9.20 se realizaron las siguientes observaciones y confirmaciones:

- La temperatura del aire de alimentación no ejerce una influencia significativa en el resultado final del proceso de deshidratación; sin embargo, el tiempo que toma el prototipo en alcanzar los 45°C incrementa a medida que la temperatura del aire de alimentación disminuye.
- El factor que tiene más influencia al momento de definir la humedad que existirá en el producto final es el tiempo de secado. Como se puede

observar en la Tabla 9.20, las naranjas que han sido sometidas al proceso de deshidratación durante 4.5 horas tienen un contenido de humedad final menor al de aquellas que solamente tuvieron un tiempo de residencia de tres horas.

- Si bien la diferencia de 0.5 lbs que se presentan en algunas pruebas representa el 25% de la carga total (2.5 lbs) no se puede considerar como un factor determinante en la humedad final del producto. Esta afirmación, sin embargo, no podría realizarse si se trataran de grandes cantidades industriales de producto ya que el comportamiento del alimento durante el proceso podría variar así como el tiempo y temperatura requeridos para el secado.

Estas observaciones permitieron llegar a la siguiente conclusión:

- De las tres variables relevantes que se eligieron para realizar el análisis del proceso solamente una (tiempo de secado) se puede considerar como principal determinante de la cantidad de humedad que existirá en el producto final, lo que se traduce en tiempo de vida útil del mismo. Sin embargo, no puede descartarse la influencia que ejercen las dos variables restantes (temperatura y carga) ya que el prototipo maneja cargas y cantidades de flujo de aire pequeñas. El comportamiento de estas variables podría experimentar un cambio considerable al manipular cualquiera de estas variables.
- El efecto contracorriente no puede ser analizado debido a que la longitud del túnel no es suficiente como para permitir que la carga viaje en sentido contrario al flujo del aire y el choque de velocidades permita un desprendimiento acelerado de las moléculas de humedad libre.

## 9.5 IMÁGENES DE LAS PRUEBAS DE SECADO

1. Balanza encerada.



2. Corte reciente de producto. Muestra fresca.



3. Medición aleatoria de muestra con calibrador Vernier.



4. Producto durante tratamiento térmico.



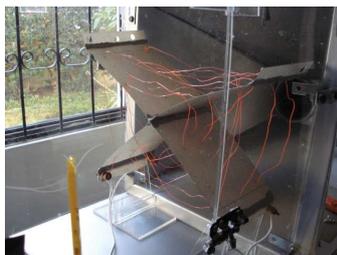
5. Producto después de tratamiento térmico.



6. Vagoneta con producto dentro de túnel de secado.



7. Calefactor en estado incandescente, Blower OFF.



8. Producto empezando a experimentar cambios de apariencia. Aproximadamente 1 hora con 30 minutos después de iniciado el proceso. Prueba #3.



9. Cortezas de producto endurecidas. Aproximadamente 2 horas 20 minutos después de iniciado el proceso. Prueba #6.



10. Producto a las 3 horas de iniciado el proceso. Prueba #4.



11. Producto al finalizar las 4.5 horas de proceso.



12. Muestra aleatoria del producto al finalizar el proceso.



13. Pesaje de bandejas finales.



14. Medición aleatoria de producto final. Calibrador Vernier.



# 10

## ANÁLISIS ECONÓMICO Y FINANCIERO

### 10.1 ANÁLISIS ECONÓMICO

#### 10.1.1 COSTOS DIRECTOS

Para el análisis económico se considerarán a los costos directos como todo egreso de dinero que haya sido destinado para la compra de materiales, herramientas y el pago de mano de obra.

##### 10.1.1.1 MATERIALES

En la siguiente tabla se detallan los materiales que han sido utilizados en la construcción del prototipo y sus respectivos costos.

Ítem	Material	Descripción	Cantidad	Costo Unitario [\$/u]	Costo Total [\$/]
1	Plancha de acero galvanizado, normalizado.	2mm	1	27.00	27.00
2	Tubo rectangular	2x1x1.5	2	13.50	27.00
3	Tubo rectangular	2x1x1	1	12.00	12.00
4	Bocines de cobre	Φi 10mm	2	4.00	8.00
5	Bocines de plástico	Φe 10mm	32	1.50	48.00
6	Acero de transmisión	Φ 40mm	1	26.00	26.00
7	Rodillos de transporte	Longitud:	16	10.00	160.00

		400mm Diámetro: 40mm Espiga: 15mm			
8	Pernos, roscas y arandelas	¼ x 2 ½ plg.	4	0.20	0.80
9	Pernos, roscas y arandelas	¼ x 1 plg.	2	0.20	0.40
10	Tornillos	⅜ x 1 plg.	4	0.20	0.20
11	Acrílico	60x60x0.4cm	1	16.00	16.00
12	Acrílico	10x30x0.6cm	2	5.00	10.00
13	Acrílico	190x49x0.3cm	3	30.00	90.00
14	Acrílico	49x49x0.3cm	2	10.00	20.00
15	Hilo resistivo de niquelina	4m x 5.8Ω	4	5.00	20.00
16	Plancha de mica resistente al calor.	30cm x 30cm	1	27.30	27.30
17	Terminales de cerámica con sujeción de cobre.		8	0.80	6.40
18	Lona negra gruesa	1.40 x 1.20	1	7.00	7.00
19	Blower	5A, 4"	1	95.45	95.45
20	Motoreductor	12V, 110rpm	1	15.00	15.00
21	Banda transmisión	¾ plg	1	2.50	2.50
22	Bisagras	3"	4	2.25	9.00
23	Pintura automotriz	Aluminio	¾ lt.	5.00	15.00
24	Fondo para pintura	Gris	¼ lt.	4.00	4.00
25	Thinner		1 gal.	3.50	3.50
26	Cable gemelo	Cal. 16	9	.20	1.80
27	Aislante para grietas	163 ml.	2	2.73	5.46
28	Tomacorrientes dobles	120V, 5ª	4	0.70	2.80
29	Molde cerámico para resistencias	15cm x 1.5cm	1	5.70	5.70
30	Electrodos acero inoxidable	Kilo	½	8.00	8.00
31	Silicón transparente industrial	732	1	5.00	5.00
32	Discos de lija	180x22 mm	2	0.60	1.20
33	Masilla plástica	1 lt.	½	2.30	2.30
34	Microcontrolador PIC	16F628	4	4.50	18.00
35	Microcontrolador PIC	16F877	2	9.90	19.80

36	Reguladores DC	LM7805	6	0.60	3.60
37	Transistores	2N3904	9	0.20	1.80
38	Diodos rectificadores	1N4007	13	0.10	1.30
39	Transistor darlington	TIP122	1	0.90	0.90
40	Resistencias	4.7 K $\Omega$	21	0.05	1.05
41	Resistencias	10 K $\Omega$	1	0.05	0.05
42	Resistencias	3.9 K $\Omega$	4	0.05	0.20
43	Potenci3metro	10 K $\Omega$	4	0.65	1.95
44	Potenci3metro	20 K $\Omega$	4	0.70	2.80
45	Displays LCD	2 x 16	4	14.00	56.00
46	Rel3s	5V, 5A	13	1.15	14.95
47	Fuente regulable	3V a 12V	1	25.00	25.00
48	Focos ne3n	120V	4	0.60	2.40
49	Selectores	On/off	6	0.55	3.30
50	Sensores de temperatura	LM35	4	3.20	12.80
51	Amplificadores operacionales	LM358	4	0.55	2.20
52	Cable Bus	14 hilos/metro	10	1.20	12.00
53	Esta3o	0.1mm, 100gr.	1	3.75	3.75
54	Baquelita	5cm x 15cm	2	1.80	3.60
55	Baquelita	5cm x 5cm	6	1.20	7.20
56	Z3calo	8 pines	4	0.25	1.00
57	Z3calo	18 pines	4	0.25	1.00
58	Z3calo	40 pines	2	0.30	0.60

<b>TOTAL</b> (sin IVA)	868.06
Impuesto al Valor Agregado	104.17
<b>TOTAL</b> (con 12% IVA)	<b>972.23</b>

El Anexo 7 ofrece una proforma de los precios comerciales de cada componente.

### 10.1.1.2 HERRAMIENTAS

Los costos por concepto de herramientas para la construcción del prototipo son los siguientes:

Tabla 10.2					
Detalle de herramientas y costos					
Ítem	Material	Descripción	Cantidad	Costo Unitario [\$/u]	Costo Total [\$]
1	Multímetro con medición de continuidad.	Digital	1	27.00	27.00
2	Cautín para estaño	60W/110V	1	5.00	5.00
3	Sierra pequeña para acrílico	30cms longitud	1	2.00	2.00
4	Metro	3metros	1	2.50	2.50
5	Programador de PICs	USB	1	57.00	57.00

<b>TOTAL</b> (sin IVA)	93.50
Impuesto al Valor Agregado	11.22
<b>TOTAL</b> (con 12% IVA)	<b>104.72</b>

### 10.1.1.3 MANO DE OBRA

El costo de conformación de la transición se tomará como un concepto especial, incluido en el detalle de costos de mano de obra, debido a la complejidad que representó su construcción.

No se consideran costos de ensamblaje de tarjetas electrónicas para control automático ya que estas fueron construidas personalmente sin intervención de ningún tercero, sin embargo, el valor a pagar por concepto de suelda de elementos electrónicos asciende hasta \$20 por tarjeta, siendo \$160 el valor total por la conformación de 8 placas de control.

Tabla 10.3					
Detalle de Mano de Obra					
Ítem	Material	Descripción	Cantidad	Costo Unitario [\$/u]	Costo Total [\$]
1	Corte planchas	Acero galvanizado	10	0.20	2.00
2	Corte tubos	Acero inoxidable	30	0.20	6.00
3	Dobleces	Acero galvanizado	30	0.15	4.50
4	Suelda plancha	Arco Eléctrico. Acero galvanizado	60	0.30	18.00
5	Perforaciones	Acero Galvanizado.	60	0.05	3.00
6	Suelda tubos	Arco Eléctrico. Acero galvanizado.	50	0.30	15.00
7	Conformación y suelda transición	Adaptación rectangular en ángulo creciente a cuello circular.	1	20.00	20.00
8	Ensamblaje	Mano de obra/horas	60	1.50	90.00
9	Pintura	Mano de obra/horas	2	1.50	3.00

<b>TOTAL</b> (sin IVA)	167.00
Impuesto al Valor Agregado	20.04
<b>TOTAL</b> (con 12% IVA)	<b>187.04</b>

## 10.1.2 COSTOS INDIRECTOS

Por concepto de Costos Indirectos se considerarán a todos aquellos valores en los que se incurrió pero que no tienen efecto directo sobre la construcción y ensamblaje del prototipo (pruebas de calibración y transporte, entre otros). Estos costos tendrán influencia en el costo comercial final del equipo, como se ve a continuación.

### 10.1.2.1 PRUEBAS DE CALIBRACIÓN

El costo por Pruebas de Calibración será calculado mediante la multiplicación del consumo eléctrico total, es decir, la cantidad de kilovatios que son utilizados durante el funcionamiento del prototipo, por el tiempo que fue requerido para realizar las pruebas. Se debe considerar que el valor por Kilovatio/hora en la ciudad de Quito asciende a \$0.08.

Horas de consumo eléctrico para pruebas de calibración.	32
Kilovatios consumidos (KW)	775
Precio KW/h (\$)	0,08

∴

$$1.5[KW] \times 32[horas] = 48[KW - h]$$

y

$$48[KW - h] \times \$0.08[KW - h] = \$3.85$$

Como se puede observar, el costo por consumo eléctrico durante las pruebas de calibración es relativamente bajo, si se considera el tamaño y potencia de los elementos que conforman el prototipo.

Los costos totales que corresponden al proceso de deshidratación serán detallados en el Análisis Financiero. En este apartado también se estudiará con más detalle el consumo eléctrico total del prototipo.

### **10.1.2.2 TRANSPORTE**

Los gastos realizados para el traslado de materiales ascienden a \$30 dólares, a los cuales, \$15 corresponden al pago de tres entregas de tubos rectangulares y planchas de acero galvanizado en el taller mecánico donde se realizaron los trabajos de construcción. Los restantes \$15 dólares fueron utilizados para el transporte del Blower, acrílicos y elementos electrónicos.

### **10.1.2.3 VARIOS**

Dentro de este rubro se encuentran aquellos imprevistos que se presentaron durante cada etapa del proceso de diseño y construcción del prototipo.

Afortunadamente, los gastos dedicados por este concepto no ascienden a cantidades significativas (\$2 dólares), los cuales fueron utilizados en el reemplazo de pernos para la sujeción del motoreductos a su base, debido a que la medida de los sujetadores originales no era apropiada para el correcto funcionamiento del equipo.

Tabla 10.5		
<b>Costos Indirectos</b>		
<b>Ítem</b>	<b>Descripción</b>	<b>Costo [\$]</b>
1	Pruebas de calibración	3.85
2	Transporte	30.00
3	Varios (imprevistos)	2.00

<b>TOTAL</b>	<b>35.85</b>
--------------	--------------

#### 10.1.2.4 TOTAL COSTOS DIRECTOS E INDIRECTOS

Tabla 10.6		
<b>Total Costos</b>		
<b>Ítem</b>	<b>Descripción</b>	<b>Costo [\$]</b>
1	Directos	1423.99
2	Indirectos	35.85
<b>TOTAL</b>		<b>1458.84</b>

Como se pudo observar en los apartados anteriores, el mayor gasto en el que se incurre corresponde a la compra de elementos electrónicos destinados al control automático del prototipo. Si se realizara un cambio de los elementos que conforman este sistema por equipos de origen electromecánico el costo destinado a este rubro sería significativamente menor. Sin embargo, uno de los propósitos del diseño y construcción de este prototipo consisten en la generación de innovaciones que, a posteriori, puedan ser aplicadas y ejecutadas en un sistema real.

Los pagos realizados para cumplir con el Impuesto al Valor Agregado, también resultan elevados. Aproximadamente \$135.43 son utilizados en el pago de este impuesto.

Si bien el valor de \$1299.84 puede parecer alto, se debe tomar en cuenta el valor comercial que tiene un deshidratador de túnel contracorriente de dimensiones reales, el cual asciende hasta \$15000, precio que corresponde a un deshidratador de túnel de 6 metros de longitud<sup>39</sup>.

Las ventajas del diseño y construcción de un prototipo han sido ya mencionadas en capítulos anteriores, y son estas las que hacen que el costo asumido sea completamente compensable en relación a la funcionalidad y utilidad productiva y didáctica del prototipo.

#### **10.1.2.5 PROPIEDAD INTELECTUAL**

Para determinar el valor real del prototipo es necesario determinar una suma económica que indique el costo intelectual (proceso de diseño) que fue invertido en este trabajo de tesis.

Este valor corresponderá al 40% del costo total del prototipo, porcentaje que se encuentra dentro de los límites establecidos como derecho de propiedad intelectual. Por lo tanto el costo por este rubro será de \$583.54 siendo el costo total del prototipo \$2042.34 + IVA.

---

<sup>39</sup> [www.cosmo.com](http://www.cosmo.com) – El Portal de la Industria.

## **10.2 ANÁLISIS FINANCIERO**

### **10.2.1 FUENTE DE FINANCIAMIENTO**

Al ser este proyecto un prototipo de deshidratador que será donado al Laboratorio de Química de la Academia Internacional JESSS no se pudo contar con apoyo financiero por lo que fue necesario acudir a un crédito del Instituto Ecuatoriano de Crédito Educativo, cuyo monto ascendió a \$2000.

### **10.2.2 VAN, TIR, FLUJO DE CAJA**

Este prototipo de deshidratador tiene fines estrictamente educativos, lo que quiere decir que no será utilizado comercialmente para producción masiva. Por lo tanto, no está sujeto a un análisis financiero en el que se especifique la producción anual ya sea de alimento deshidratado o de prototipos.

En caso de existir la oportunidad de venta del prototipo, no deberá ser negociado a un valor menor al especificado en el análisis económico.

# 11

## ANÁLISIS DE IMPACTO AMBIENTAL

El presente capítulo está dedicado al análisis de impacto ambiental que tendrá el prototipo una vez que haya sido puesto en funcionamiento.

Para todo proyecto industrial, con fines comerciales o científicos, es necesario realizar este tipo de análisis el cual, una vez terminado, es referido a la Dirección de Medio Ambiente donde se aprobarán o no los aspectos ecológicos y de impacto ambiental del proyecto.

Este, al ser un prototipo que no será utilizado comercialmente, no está sujeto a la presentación de este tipo de documentos; sin embargo, a lo largo de este capítulo se definirán aspectos que deben ser considerados en un análisis de impacto ambiental real.

### *Localización geográfica y funcionalidad.*

El prototipo estará ubicado en el Laboratorio de Química de la Academia Internacional “Jesss”, la que a su vez está localizada en el sector Amagasi del Inca del Distrito Metropolitano de Quito.

Este sector está caracterizado por ser una zona escolar con residencias circundantes y pequeños bosques. El tránsito vehicular es bajo y no existen cantidades de contaminación industrial (ruido, CO, etc.) considerables.

Las áreas de impacto serán consideradas como las aulas inmediatas al Laboratorio de Química, las cuales recibirán directamente el ruido producido por el Blower.

*Características de la actuación del prototipo.*

Este prototipo puede ser considerado como “ambientalmente amigable” debido a que no produce emisiones resultantes de la combustión de derivados del petróleo y su principal fuente de alimentación es la electricidad. Sin embargo, a pesar de que la electricidad se conoce como un tipo de energía limpia, se debe considerar que las actividades que envuelven la producción comercial de electricidad involucra procesos a veces nocivos para el ambiente; es entonces necesario que se realice un pequeño análisis para determinar si el consumo eléctrico del prototipo justifica frente a la capacidad productiva del mismo (despreciando el hecho de que el prototipo no fue diseñado para producir en cantidades industriales o con fines comerciales).

Cada kilogramo de producto deshidratado requerirá cerca de \$0.30 de consumo eléctrico, sin embargo, siempre existirá la posibilidad de reducir el consumo (o desperdicio) eléctrico por medio de modificaciones en el prototipo, entre estas se pueden mencionar:

- Cambio de material de túnel,
- Aislamiento,
- Disminución de flujo de aire.

#### *Emisiones al aire:*

El gas resultante del proceso que será emitido al aire estará compuesto por vapor de agua con rastros de nutrientes provenientes de la naranja y el pimiento, lo cuales son considerados como inofensivos.

No existen emanaciones atómicas o moleculares de carbono, conocidas por su alta nocividad al aire.

#### *Emanaciones al agua:*

Los residuos del proceso no serán vertidos en ningún tipo de fuente acuática ya que su naturaleza los convierte en un excelente abono natural; por lo tanto, serán reutilizados en suelos cultivables.

En caso de existir cantidades significativas de jugos de residuo en el proceso, estos no serán eliminados en afluentes de agua sino que formarán parte del abono hecho con los residuos sólidos del proceso.

Bajo ninguna circunstancia se podrá regar agua sobre el prototipo durante su mantenimiento (ver Capítulo 12) ya que ésta se contaminará con el aceite utilizado para la lubricación y a su vez afectará al suelo o afluente acuática donde vaya a ser desechado el líquido de limpieza.

#### *Emanaciones al suelo:*

Como ya fue mencionado en párrafos anteriores, los desechos de origen orgánico serán reutilizados a manera de abono, cualquier otro tipo de desecho deberá ser debidamente identificado y clasificado según su grado de biodegradabilidad.

*Ruido:*

El ruido producido, principalmente por el soplador, está dentro de los niveles ambientales e industriales (de 60dB a 85 dB), siendo su valor igual a 70 dB, valor obtenido de las especificaciones comerciales de las manejadoras de aire de 500CFM.

No existen otros elementos en el prototipo que produzcan ruido y puedan ser considerados como un factor contaminante.

*Instalaciones e infraestructura:*

Dentro de la Academia Internacional “Jesss” ya existe la infraestructura apropiada para albergar al prototipo, lo que evitará la necesidad de construir nueva infraestructura la cual podría requerir el uso de espacios forestales.

# 12

## MANUAL DE MANTENIMIENTO

Las operaciones de mantenimiento que deberán llevarse a cabo en el prototipo serán presentadas a manera de sinopsis. Si bien estas actividades son las recomendadas para la prolongación de la vida útil del equipo, está abierta a modificaciones que representen cambios positivos en el proceso.

Dentro del mantenimiento del prototipo se debe poner énfasis en el cuidado de los sistemas de control, debido a que son éstos los que permiten que el proceso sea llevado a cabo, además de ser la parte más costosa del mismo. Se recalca también que está completamente prohibido el uso de líquidos durante el mantenimiento de los sistemas de control, ya que estos pueden ser contraproducentes provocando efectos como corto circuitos e inestabilidad en los microprocesadores. Previo a la limpieza de banda, bandejas y otros elementos que requieran la utilización de agua, se deberán cubrir los sistemas de control apropiadamente para que no estén en contacto con el líquido. Por otro lado, la limpieza que se realice con agua deberá ser llevada a cabo de la siguiente forma:

- La tela de limpieza deberá ser sumergida en el líquido y posteriormente exprimida con el fin de que el agua no se derrame sobre otras superficies.
- Bajo ninguna circunstancia se aplicará agua directamente sobre los elementos a limpiar.
- Posterior a la limpieza con agua se tomará una tela seca y se procederá a retirar los residuos de agua de la superficie. Esto no será necesario cuando la limpieza se realice con alcohol.

Todas las actividades de mantenimiento, sin excepción, deberán ser realizadas solamente si las alimentaciones eléctricas de prototipo, tanto a 110V como a 12V, están desconectadas y todos los interruptores en posición OFF.

En caso de que se haya derramado agua sobre el panel o sistemas de control, se procederá a hacer lo siguiente:

- Verificar que no exista alimentación eléctrica de ningún tipo. En caso de presentarse inobservancia en las normas de mantenimiento se procederá a desconectar toda alimentación eléctrica y todo interruptor se colocará en posición OFF.
- Con el uso de un ventilador o secador de cabello (preferiblemente configurado a temperatura media) se procederá a retirar el exceso de agua existente en la superficie de los microprocesadores y otros elementos electrónicos.
- El prototipo deberá mantenerse fuera de funcionamiento por lo menos durante 48 horas. Si el líquido fue derramado sobre la fuente regulable se deberán esperar 92 horas para poder asegurar la completa evaporación del agua.

En caso de que el líquido derramado sea alcohol se esperarán únicamente 4 horas antes de poner al prototipo en funcionamiento.

Como se puede observar, fallas en el mantenimiento pueden producir no solamente retrasos en la producción sino también la pérdida total de elementos electrónicos entre los cuales los microprocesadores y Displays LCD cuentan como los más delicados y costosos.

El valor asignado para mantenimiento será trimestral y corresponderá al costo de la fuente regulable (elemento más costoso) más \$10, valor en el que se incurriría por la programación de los microprocesadores.

Tabla 12.1			
<b>PROTOTIPO DE DESHIDRATADOR DE TÚNEL CONTRACORRIENTE PARA FRUTAS Y VERDURAS</b> <b>MANUAL DE MANTENIMIENTO</b> <b>SINOPSIS</b>			
<b>INTERVALO</b>	<b>LUGAR</b>	<b>MEDIO AUXILIAR</b>	<b>PROCEDIMIENTO</b>
<b>DIARIO</b>	Bandas de entrada y salida.	- Tela de limpieza, - Agua,	Limpieza de superficie de bandas (rotación durante mantenimiento) para despejar impurezas y polvo.
		- Tela y alcohol.	Desinfección de superficie de bandas (rotación durante mantenimiento).
	Blower.	- Tela de limpieza.	Inspección Visual de entrada de aire del Blower. Limpieza.
	Bandejas base.	- Aire comprimido,	Restricción de desperdicios en bordes utilizando aire comprimido.
		- Aspiradora manual.	Succión de desperdicios ubicados en los bordes.
	Paredes túnel.	- Tela y alcohol.	Limpieza de superficie de paredes. Supervisión visual para detectar fisuras.
Máquina general.	- Tela de limpieza.	Eliminación de polvo en estructura general.	
<b>SEMANAL</b>	Sistemas de control.	- Aire comprimido.	Limpieza de tarjetas electrónicas. No utilizar tela de limpieza.
	Rodillos transmisión.	- Aire comprimido, - Tela de limpieza.	Limpieza y restricción de residuos en rodillos de transmisión.
	Bisagras.	- Aire comprimido, - Tela de limpieza.	Limpieza de bisagras y paneles.
	Panel de control.	- Tela y alcohol.	Limpieza de LCDs y Panel acrílico.
<b>MENSUAL</b>	Rodillos transmisión.	- Texaco Merota 150.	Lubricación de rodillos de entrada y salida.
	Transición	- Celulón.	Inspección visual de boquete de transición. Se se encuentran escapes de aire, aislar con celulón.
	Calefactor	- Hilo de niquelina de 5,8 Ohm, #22. - Masilla epóxica/ masilla de enderezador.	Inspección visual de resistencias y soporte. En caso de encontrar fisuras en las niquelinas, reemplazar. Roturas o fisuras en soporte, corregir con masilla epóxica o masilla de enderezador.
<b>SEMESTRAL</b>	Sistemas de control	- Programador PICs USB, - Microcontroladores	Inspección de software de microcontroladores y reemplazo si es necesario.
<b>ANUAL</b>	Sistemas de control	Programador PICs USB	Programación de PICs conforme al software especificado.

# 13

## MANUAL DEL USUARIO

Debido a que este prototipo será operado por un tercero que no está familiarizado con el sistema de control, es necesario realizar un Manual del Usuario que esté sintetizado pero que sea lo suficientemente claro para que cualquier operador pueda hacer que el prototipo entre en funcionamiento de forma segura y sin riesgo de alterar ningún sistema de control.

El manual del usuario sólo se enfocará en el uso intrínseco del prototipo, es decir, no contendrá instrucciones sobre cómo se deben realizar los cortes de la naranja o pimiento o cómo deben ser colocados sobre las bandejas. Este manual indicará cuál es el procedimiento que se debe seguir para que los sistemas de control activen el prototipo sin poner en riesgo la integridad de los mismos. También se incluirán recomendaciones y alertas especiales para poder reconocer cuándo un sistema ha comenzado a fallar o cuándo es necesario realizar tratamiento correctivo. Es necesario que el operador encargado de poner en funcionamiento el prototipo, siga estrictamente los pasos descritos en el Manual del Usuario; esto prolongará la vida útil de los sistemas de control, asegurará que el proceso sea correcto y que el producto final apropiado.

Previo a poner el prototipo en funcionamiento deberá cargarse la vagoneta dentro del túnel y las puertas deben estar completamente cerradas antes de proseguir con el funcionamiento.

Se recomienda que en primer lugar se enciendan las resistencias por algunos minutos para que el entorno de la vagoneta sea propicio para la deshidratación.

Tabla 13.1

**PROTOTIPO DE DESHIDRATADOR DE TÚNEL CONTRACORRIENTE PARA FRUTAS Y VERDURAS  
MANUAL DEL USUARIO**

<b>PASO</b>	<b>ACTIVIDAD</b>	<b>OBSERVACIONES</b>
<b>1</b>	Asegurar la conexión real a tierra de los sistemas de control.	La conexión real a tierra es una pequeña cadena que sale del neutro de la fuente de alimentación de los sistemas de control, esta cadena debe estar en contacto continuo con el suelo sobre el cual está colocado el prototipo.
<b>2</b>	Regular la fuente de alimentación de los sistemas de control.	Con voltajes menores a 9V algunos sistemas no podran operar, se recomienda mantener el nivel de tensión en 9V-12V.
<b>3</b>	Conectar todas las alimentaciones de 110V a su respectiva toma eléctrica.	Los sistemas que permanezcan sin alimentación no estará en capacidad de operar.
<b>4</b>	Asegurarse que el interruptor de emergencia del Blower esté en ON.	El interruptor de emergencia del Blower se encuentra a un costado del mismo y se caracteriza por su color rojo, si no está en posición ON no podrá funcionar a pesar de que el resto de interruptores que lo comandan estén activos.
<b>5</b>	Colocar el interruptor "Energía Blower" en ON.	Activa el sistema de control pero no lo pone en funcionamiento.
<b>6</b>	Colocar el interruptor "Energía Resistencias" en ON.	Activa el sistema de control y lo pone en funcionamiento.
<b>7</b>	Colocar el interruptor "Energía Motores" en ON.	Activa el sistema de control pero no lo pone en funcionamiento.
<b>8</b>	<i>Actividad Recomendada</i>	Se recomienda esperar unos minutos antes de poner en funcionamiento el resto de sistemas. El termómetro indicará la temperatura existente en el túnel, en un inicio tanto el banco de resistencias como la resistencia auxiliar serán activados, una vez que el banco de resistencias se apague se puede proceder al encendido del Blower y el motor.
<b>9</b>	Colocar el interruptor de "Control Energía Motores" en ON y seleccionar producto que se desea seleccionar.	Para poder activar el sistema de control es necesario determinar cuál es el producto que se desea deshidratar, esto determinará la velocidad a la que debe operar la banda y el tiempo de exposición del producto dentro del túnel.
<b>10</b>	Apagar todos los interruptores.	Una vez que el producto ha salido del túnel se deberán colocar todos los interruptores en posición OFF.
<b>11</b>	Desconectar todas las alimentaciones a 12V y 110V.	Esta acción prevendrá que existan fugas de energía y desgaste de los sistemas.

# 14

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 14.1 CONCLUSIONES

- La ausencia de medios adecuados para determinar experimentalmente cuál debería ser la longitud del túnel y el tiempo de secado, obligan a asumir valores para poder llevar a cabo el proceso de diseño y construcción, en este caso el valor asumido fue la longitud del túnel de secado y su evaluación permite confirmar la validez del diseño.
- El proceso de deshidratación a temperaturas muy altas tienden a dañar el producto. Se puede obtener un producto de buena calidad si se mantiene una temperatura media constante y un flujo de aire fuerte.
- La cualidad “contracorriente” en un deshidratador de túnel está dada por la longitud del mismo, en este prototipo no es posible observar este fenómeno ya que su espacio es excesivamente limitado y su comportamiento tiende más hacia el de un horno deshidratador.
- El prototipo cumple su propósito de deshidratar frutas y vegetales llegando a disminuir la humedad en un 85%.
- La evaluación del prototipo basada en la aplicación del fenómeno de contracorriente indica la necesidad de incrementar la longitud del túnel.
- El tratamiento térmico de escaldado, aplicado previo al proceso de deshidratación, es satisfactorio ya que desactiva algunas de las enzimas encargadas de la descomposición de los alimentos, sin que se presenten cambios desfavorables en los aspectos organolépticos.

- Se establecieron tres parámetros o variables de control para el análisis de las pruebas de secado, los cuales fueron: temperatura, tiempo de proceso y carga másica de la vagoneta.
- La temperatura del aire con el que se alimenta al prototipo tiene incidencia en el tiempo necesario para que la temperatura dentro del túnel alcance los 45°C. Esta hipótesis fue comprobada de manera experimental durante las pruebas de secado en donde se observó que cuando el Blower era alimentado con aire a bajas temperaturas se requería de mayor tiempo para alcanzar la temperatura de secado óptima.
- Paradas eventuales del Blower permiten disminuir el tiempo de espera para alcanzar los 45°C. Sin embargo, el realizar esta actividad durante más de tres minutos puede poner en riesgo la integridad del acrílico que conforma las paredes y techo del túnel. Al encender el Blower nuevamente se puede observar transferencia de calor al presentarse cambios bruscos en la lectura de los termómetros.
- La diferencia de carga másica (0,5 lbs) que se presentan en las pruebas de secado no tienen incidencia significativa en la humedad del producto resultante; sin embargo, este es un fenómeno que no puede ser aplicado a todo tipo de proceso o deshidratador.
- El tiempo de secado es el factor más importante para obtener un producto final con contenidos de humedad bajos. Se pueden producir alimentos deshidratados con bajo contenido de agua al someterlos a un proceso de deshidratación largos con temperaturas moderadas.
- 4.5 horas de proceso a una temperatura ascendiente hasta los 45°C no permite obtener un producto con un 10% de humedad final, valor que fue planteado como óptimo; no obstante se alcanzaron contenidos de agua cercanos al 15%, por lo que, si se desea obtener un producto que pierda el 90% de su CDA, será necesario que sea sometido a un proceso cuya duración sea mayor.

- Las propiedades organolépticas del producto resultante son apropiadas y aceptables ya que no presentan cambios desfavorables en lo que a aspecto exterior, sabor, olor y textura se refieren.
- El efecto contracorriente es inexistente en el prototipo debido a la longitud reducida del túnel.
- Durante la operación del prototipo se encontró que el acrílico no es un material eficiente para el aislamiento térmico que es necesario en elementos con alta emisión de calor; asimismo se encontró que las pérdidas de calor son considerablemente altas, lo que quiere decir que al aislar el prototipo con lana de vidrio se podrían obtener procesos con menor duración y consumo eléctrico.
- El costo total de un prototipo es mucho menor a aquel que se pagaría por maquinaria real para deshidratación, sin embargo, las prestaciones de un prototipo son limitadas en comparación con aquellas entregadas por máquinas especializadas.

## **14.2 RECOMENDACIONES**

- Previo al diseño de cualquier tipo de prototipo de máquina se deben identificar las variables más significativas del proceso; de esta forma se pueden obtener puntos de inicio y puntos meta para llevar a cabo el proyecto. En el caso del diseño y construcción de este prototipo, los valores correspondientes a estas variables fueron obtenidas por medio de bibliografía especializada.
- Después del tratamiento térmico se debe dejar al producto en reposo dentro de un colador durante por lo menos una hora; de esta forma se eliminará el exceso de agua absorbida durante el tratamiento.

- Las bandejas donde se colocará el producto deben ser tratadas para higienización, previo al proceso, por medio de la utilización de vapor de agua o sumergirlas en agua caliente.
- Se recomienda continuar con la evaluación del tiempo de secado manteniendo una temperatura constante de 45°C para corroborar los resultados obtenidos.
- Se deben colocar aislantes en las zonas de los paneles más propensas al calor, es decir la transición y paneles de acrílico por lo menos hasta la puerta de salida.
- Para la operación del prototipo los manuales de mantenimiento y usuario deberán ser respetados completamente.
- En el proceso de armado de placas y mantenimiento, especialmente al trabajar con microprocesadores, se recomienda el uso de guantes quirúrgicos de látex. Esta medida prevendrá el posible daño de los PICs debido a descargas eléctricas naturales en el cuerpo humano.
- Se recomienda reemplazar los potenciómetros de 10K, comunes en los circuitos con conexión a LCD, por resistencias variables de 5K; esto permitirá que la lectura del display sea más clara.
- Se deben colocar protecciones de silicona en todas las conexiones que puedan presentar riesgo de ruptura o corto circuito.