

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN HORNO DE TIPO
POLIÉDRICO INCLINADO PARA SECADO DE FRUTAS POR
CONDENSACIÓN, CON UNA CAPACIDAD MÁXIMA DE 55 Kg.
PARA EL LABORATORIO DE ENERGÍAS RENOVABLES- FIME**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
MECÁNICO**

**Enrique Santiago De Guzmán Valdivieso
Jorge Eduardo Meythaler Naranjo**

DIRECTOR: Ing. José Guasumba C.

CODIRECTOR: Ing. Ernesto Soria

Sangolquí, 2007-06

CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO

El proyecto “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN HORNO DE TIPO POLIÉDRICO INCLINADO PARA SECADO DE FRUTAS POR CONDENSACIÓN, CON UNA CAPACIDAD MÁXIMA DE 55 Kg. PARA EL LABORATORIO DE ENERGÍAS RENOVABLES- FIME” fue realizado en su totalidad por Enrique Santiago De Guzmán Valdivieso y Jorge Eduardo Meythaler Naranjo, como requerimiento parcial para la obtención del título de Ingeniero Mecánico.

Ing. José Guasumba

Ing. Ernesto Soria

Sangolquí, 2007-05-31

LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN HORNO DE TIPO POLIÉDRICO
INCLINADO PARA SECADO DE FRUTAS POR CONDENSACIÓN, CON UNA
CAPACIDAD MÁXIMA DE 55 Kg. PARA EL LABORATORIO DE ENERGÍAS
RENOVABLES- FIME”**

ELABORADO POR:

ENRIQUE DE GUZMÁN V.

EDUARDO MEYTHALER N.

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

**CRNL.SP. ING. JUAN DÍAZ T.
COORDINADOR DE CARRERA INGENIERÍA MECÁNICA**

Sangolquí, 2007-06

DEDICATORIA

La presente quiero dedicar a mis padres Eduardo y Gladys, quienes han sido los responsables de mi formación tanto académica como personal con su ejemplo de moral y ética.

A mis hermanas y cuñados, en especial a Mónica y Juan Manuel. Con quienes he vivido en mis años de estudio.

A mi familia y amigos en general, sobre todo a mi tía Lucia, que aunque no este con nosotros físicamente. Se que siempre está conmigo.

Eduardo Meythaler Naranjo.

AGRADECIMIENTO

RESUMEN

La industria agroalimentaria utiliza la deshidratación como método de conservación de un gran número de productos, y la imagen de “natural” que da el secado hace que se utilice para fabricar productos de alto valor añadido, por ejemplo frutas y granos para cereales de desayuno y snacks. No obstante, el secado afecta profundamente las características del alimento tratado, no tanto en lo que tiene que ver con su valor nutritivo, ya que en la mayoría de los alimentos este no se ve afectado, sino en lo que tiene que ver con su sabor y textura e inclusive muchas veces éstos requieren de mayor tiempo para cocerse.

En el Ecuador hace falta un poco de iniciativa para dar a sus productos un valor añadido que nos haga más competitivos frente a otros países con el mismo tipo de producción. Es cierto que estos métodos de secado de frutas ya se han empezado a aplicar en el país, pero con métodos tradicionales que no son muy eficientes.

Además, hoy en día toda industria o empresa cualquiera que esta sea, busca el ahorro de energía como una parte fundamental de reducción de costos, ya que la competencia es cada día mayor y se necesitan bajar costos de producción para ser más competitivos, y es por esto que es necesario buscar un proceso que sea más eficiente para obtener mayor ahorro de energía.

Es así que nosotros propusimos la construcción de un horno que sea más eficiente, el mismo que nos permita realizar pruebas prácticas en los laboratorios de la ESPE, y nos permita determinar características específicas de secado en diferentes productos, y de esta manera aportar con datos reales que permitan mejorar la calidad de los mismos, sobre todo en afectar menos las características de los productos tratados.

Se realizaron los cálculos pertinentes y se construyó un horno de tipo poliédrico inclinado, cuya fuente de calor es aire caliente, proveniente de un intercambiador de calor que utiliza biomasa (cascarilla de arroz) como combustible, con la ayuda de un ventilador axial que nos da un máximo de 800 CFM, controlado por un sistema de control automático de temperatura, el cuál, detiene el flujo de aire el momento en que el interior de la cámara llega a la temperatura programada manualmente para cada producto. Ésta temperatura está medida en el interior por medio de una termocupla que envía el dato de la temperatura al sistema de control. En el interior de la cámara se tiene cuatro bandejas colocadas en forma inclinada al igual que el horno, con un traslape de 3cm, lo cual permite que el agua eliminada por el producto se deslice por gravedad y caiga por unos agujeros en la parte posterior de las bandejas, sin que ésta caiga sobre el producto que se encuentra en la bandeja inferior, para no afectar al mismo. Al caer el agua en la base del horno, de igual manera se desliza hasta la parte posterior del mismo, en donde sale por un desfogue, permitiendo disminuir pérdidas de energía en calentar esa agua.

La forma poliédrica y la posición en la que se colocó el horno permiten que, si se produce algo de condensación en las paredes, ésta se deslice de igual manera y salga también del horno, a pesar de que el recubrimiento con lana de vidrio que se utilizó, que tiene un espesor de 2", está diseñado para que no se produzca esa condensación, porque eso de todas formas representa pérdidas.

Las pruebas realizadas nos entregaron datos muy satisfactorios, obteniendo un producto muy agradable, y dentro de un rango razonable de tiempo con respecto a lo esperado por los cálculos realizados de forma teórica. Además se comprobó el adecuado funcionamiento de todo el sistema, por lo que éste horno puede ser utilizado perfectamente para pruebas dentro de los laboratorios de energías o para proyectos de investigación del CICTE, quienes nos auspiciaron para la realización de éste proyecto.

El análisis económico-financiero refleja resultados muy convenientes para este tipo de proyectos, ya que demuestra que es un proyecto muy rentable y atractivo, de fácil recuperación de inversión, obviamente siempre y cuando la producción y venta de los productos sea manejada de la mejor manera. Hay que pensar en que es un sistema que puede revolucionar el mercado y mejorar en cierto modo la comercialización y la salida de los productos, al darles un mayor valor agregado, lo que nos puede llevar a ocupar un mayor y mejor mercado en el futuro, y sobre todo puede ser una gran fuente de trabajo que mejore la situación de nuestro país.

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES

1.1 ANTECEDENTES

Uno de los principales recursos de nuestro país es la agricultura, siendo la producción de frutas una de los rubros más altos dentro de este campo. Pero debido a su naturaleza constitutiva éstas son muy propensas a daños, no sólo físicos sino el en lo que respecta al color, sabor, aroma y contenido vitamínico y nutritivo. Es por esto que su almacenamiento y transporte es muy complicado, y muchas veces produce la pérdida de grandes cantidades de frutas, o la venta de éstas a precios muy bajos, representando un gran problema para los fruti cultores sobre todo en épocas de abundancia, en donde se dan considerables pérdidas económicas.

Debido a este problema es que se ha empezado a utilizar el secado de frutas como solución para la conservación y transporte de las mismas, por lo que el objetivo principal

de éste proyecto es encontrar un método de secado más eficiente, para reducir pérdidas en sus valores nutritivos y sobre todo el cambio en su sabor y textura.

El secado de frutas por condensación en un horno poliédrico inclinado pretende cumplir con esas expectativas, ya que por su diseño éste va a reducir considerablemente los tiempos de secado, obteniendo así menos pérdidas de las propiedades naturales de la fruta.

Para el proceso mismo del secado se establecerán las condiciones más adecuadas para cada una de la tres frutas motivo del presente estudio (manzana, uvilla y durazno), esto es temperatura del aire, tiempo de secado y pretratamientos aplicados, para de ésta forma obtener un producto apto para el consumo humano.

1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Una fuente importante de nutrientes para los seres humanos y los animales la ha constituido desde siempre los alimentos de origen vegetal. Estos alimentos aportan los carbohidratos necesarios en la dieta, tales como azúcares, almidones y fibra. Igualmente las frutas aportan agua, enzimas, minerales, vitaminas y otros compuestos que son importantes en el mantenimiento de una buena salud.

El deterioro de la frutas¹ comienza en el cultivo, en la misma planta donde se desarrolla. Son innumerables y variadas las plagas que las invaden, aparte de los depredadores como pájaros, insectos y otras especies que compiten con el hombre por el consumo de estos productos.

Una vez cosechadas las frutas sanas, pintonas o maduras, como todo ser vivo, están sometidas a procesos naturales de deterioro y descomposición progresivos. Este

¹ Desrosier., N.W. 1963 "The Technology of Food Preservation" AVI Publishing Co., Westport, Conn.

deterioro se ve acelerado por el inadecuado manejo que puede realizarse durante las operaciones de poscosecha. Este tipo de manejo favorece reacciones fisiológicas de deterioro, y en la mayoría de los casos facilitan la contaminación microbiana.

Se puede afirmar que los microorganismos (MO) son la principal causa de deterioro grave y rápido que pueden dañar las frutas en cualquier momento de su vida. Los MO producen daños irreversibles en las frutas, los cuales se detectan fácilmente por el cambio producido en una o más de sus características sensoriales, es decir su apariencia, aroma, color, sabor y textura.

El tipo de MO invasor y la velocidad de desarrollo en las frutas o sus derivados, están determinados por varias condiciones relacionadas con las condiciones ambientales y las características de estos productos que le servirán de alimento. Los MO se desarrollan en medios que les son más favorables y les están disponibles.

Las principales condiciones internas del alimento que influyen en el desarrollo microbiano son: el contenido de humedad o mejor aún su disponibilidad del agua, a_w , la acidez y pH, la capacidad tamponizante (buffer), el potencial oxirreducción (Eh), la composición nutricional, el grado de madurez, la presencia de constituyentes antimicrobianos y su estructura.

Las condiciones externas al alimento que influyen en el desarrollo de MO son: la temperatura, la humedad relativa, la composición de la atmósfera o del medio que rodea al alimento, el grado de contaminación, la flora o presencia de agentes depredadores circundantes y las radiaciones.

En todos los casos el grado del daño por MO a la fruta está en proporción exponencial al tiempo en que permanezcan sometidas a las anteriores condiciones que favorecen la contaminación y deterioro.

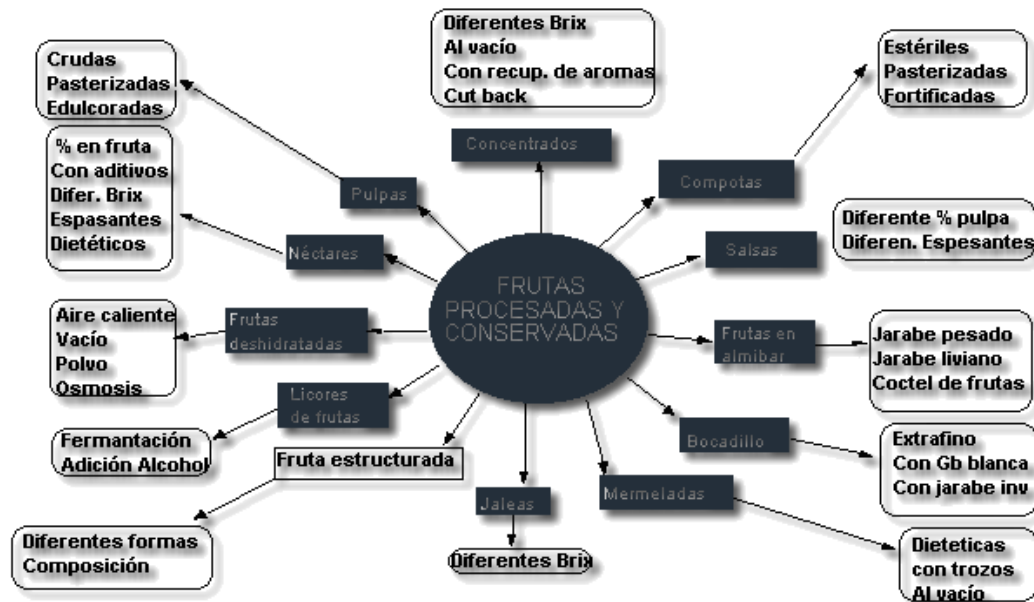


Figura 1.1. Alternativas de procesamiento y conservación de frutas²

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

- Diseñar y construir un horno poliédrico inclinado para secado de frutas por condensación, el mismo que nos permita realizar pruebas prácticas en los laboratorios de la ESPE, y nos permita determinar características específicas de secado en diferentes productos.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar cada uno de los elementos del secador de frutas.
- Diseñar las bandejas para el manejo de las frutas dentro del horno.
- Comparar la eficiencia de este tipo de horno con hornos convencionales.

² Potter., N.N.,1978 "La Ciencia de los Alimentos". 2 Edición. Edutex. S.A. México 13 D.F.

- Efectuar pruebas de funcionamiento, puesta a punto y calibración del equipo con tres diferentes frutas (manzana, uvilla y durazno).

1.4 JUSTIFICACIÓN

La industria agroalimentaria utiliza la deshidratación como método de conservación de un gran número de productos, y la imagen de “natural” que da el secado hace que se utilice para fabricar productos de alto valor añadido, por ejemplo frutas y granos para cereales de desayuno y snacks. No obstante, el secado afecta profundamente las características del alimento tratado, no tanto en lo que tiene que ver con su valor nutritivo, ya que en la mayoría de los alimentos este no se ve afectado, sino en lo que tiene que ver con su sabor y textura e inclusive muchas veces estos requieren de mayor tiempo para cocerse.

Además, hoy en día toda industria o empresa cualquiera que esta sea, busca el ahorro de energía como una parte fundamental de reducción de costos, ya que la competencia es cada día mayor y se necesitan bajar costos de producción para ser más competitivos. Es por esto que es necesario buscar un proceso que sea más eficiente para obtener mayor ahorro de energía.

Existen hornos para secado en superficies extendidas, por convección natural, forzada, utilizando cámaras de tipo cilíndrico, o rectangular. Los tiempos de secado de este tipo de hornos son prolongados en vista de que luego de la evaporación del agua se produce una atmósfera de vapor de agua que si no es debidamente removida retorna al producto.

Con el presente proyecto se pretende optimizar las características térmicas de radiación y convección y aumentar la velocidad de secado mediante la evacuación del agua por gravedad, obteniendo con esto un procedimiento de secado de frutas o de granos

de alto rendimiento cuya tecnología debidamente concebida podrá ser aplicada a la industria nacional.

1.5 ALCANCE DEL PROYECTO

El proyecto tiene un alcance a nivel local, ya que el horno a diseñar y construir es un horno semi-industrial con capacidad para 55 Kg. de fruta, el cuál será instalado en los laboratorios de la ESPE para realización de varias pruebas que, a través de sus resultados, permitan determinar su eficacia con respecto a otros sistemas de secado de frutas, y así pensar en su fabricación a mayor escala a futuro y ampliar su alcance a nivel nacional.

El campo de aplicación para este tipo de horno es muy amplio, ya que a pesar de estar dirigido exclusivamente al sector agrícola, en nuestro país este campo es extremadamente amplio, tomando en cuenta que la deshidratación no solo se la puede realizar en frutas sino en cualquier tipo de alimento proveniente del suelo.

CAPÍTULO 2

DESHIDRATACIÓN DE ALIMENTOS

2.1 IMPORTANCIA DE LA DESHIDRATACIÓN

La humanidad desde tiempos inmemoriales encontró razones de importancia que lo llevaron a decidir producir y conservar los alimentos que no podía consumir de forma inmediata y completa luego de la cosecha debido a la descomposición y el daño causado por microorganismos. Por lo que se han utilizado dos métodos fundamentales para este fin³:

- Métodos Físicos, someten al alimento a un tratamiento físico que actúa en contra del crecimiento bacteriano. Entre los métodos físicos más utilizados son: la esterilización (aplicación de altas temperaturas), la pasteurización (aplicación de medias temperaturas), la refrigeración y la congelación (aplicación de bajas temperaturas), la deshidratación (extracción de agua) y la irradiación entre otros.
- Métodos Químicos, adicionan una sustancia química para disminuir o detener el desarrollo de los microorganismos. Estas sustancias también llamadas conservadoras son el vinagre, la sal común, ácidos como el sórbico, láctico, bórico, fórmico, acético, propiónico, benzoico, salicílico, sódico, el anhídrido sulfuroso, el oxido de etileno, bromatos, fluoruros y fosfatos.

La deshidratación ha sido, desde tiempos remotos, un medio de conservación de alimentos. El agua retirada durante este secado, deshidratación o concentración, puede ser eliminada de los alimentos por las simples condiciones ambientales o por una

³ Singh, R.P., Heldman, D.R. Introduction to Food Engineering, 2nd edition. (1993) Academic Press.

variedad de procesos controlados de deshidratación en los que se someten a técnicas que emplean diferentes medios como calor, aire, frío, y ósmosis.

El secado al sol permite retirar agua hasta niveles del 15%, que es suficiente en algunos casos. Por este sistema se requiere un espacio bastante grande y los alimentos expuestos al sol son susceptibles a la contaminación y a pérdidas debidas al polvo, los insectos, los roedores y otros factores.

Por las razones anteriores el secado al sol evolucionó a fin de realizarlo en recintos interiores en donde las condiciones pudieran ser controladas en forma más eficiente. Hoy en día el término deshidratación de alimentos se refiere al secado artificial bajo control. Esta eliminación de agua puede ser casi completa y se busca prevenir al máximo los cambios en el alimento, a fin de lograr luego, durante la reconstitución, obtener productos lo más parecidos a los alimentos originarios. Los niveles de humedad remanente llegan alcanzar valores de 1 al 5%, según el producto. Por lo general la calidad lograda en la de deshidratación es proporcional al costo del proceso aplicado, existiendo sus excepciones.

2.2 VENTAJAS DE LA DESHIDRATACIÓN

Además de los fines de la conservación de alimentos por la estabilización microbiológica, la deshidratación se realiza para obtener otras ventajas⁴ como son:

- Disminuir el peso y el volumen de los alimentos. El peso se puede llegar a disminuir 8 veces su peso original. Esto resulta evidentemente en ahorro en el costo del transporte y de los empaques.
- Facilita el manejo de los productos y su comercialización.
- Producir materias primas de mayor calidad.
- El productor puede incrementar sus ganancias al dar un valor agregado a sus productos.

⁴ Toledo, R. T. Fundamentals of Food Process Engineering. 2nd. Edition. (1991) Van Nostrand-Reinhold.

2.3 TEORÍA DE LA DESHIDRATACIÓN

2.3.1 ACTIVIDAD DE AGUA

El agua contenida en un alimento⁵, sea de origen animal o vegetal, está más o menos “disponible” para participar en las reacciones físicas, químicas y microbiológicas. Esta “disponibilidad” varía de un producto a otro según su composición, algunas estructuras o moléculas retienen más agua que otras: varía incluso para un mismo producto, un fruto maduro no se comporta de la misma forma que un fruto verde.

La mejor forma de expresar esta “disponibilidad”, es decir el “grado de libertad” del agua de un producto, es la relación parcial de agua en el alimento (p) y la presión de vapor del agua pura (p_o) a la misma temperatura.

La relación

$$a_w = \frac{p}{p_o} = \frac{\%HRE}{100} \quad (2.1)$$

define la actividad de agua en el producto y su relación con la humedad relativa de equilibrio (%HRE) del medio. El concepto fue introducido en 1957 por el microbiólogo Scott y hoy en día se considera junto a la temperatura, uno de los parámetros más importantes que influyen en las relaciones de deterioro de los alimentos. El efecto de la actividad de agua se ha estudiado no sólo para definir la estabilidad microbiológica del producto sino también por su influencia en las reacciones bioquímicas que se producen en el sistema y su relación con la estabilidad del alimento.

La actividad de agua se define con relación a un estado de referencia que es el del agua pura, para el cual dicha actividad es igual a 1, $p=p_o$. Si el agua está ligada

⁵ Joslyn., M.A. 1963 Food Processing by Drying and Dehydration". Vol.2 AVI Publishing Co., Westport. Conn.

al sustrato seco por fuerzas de unión físico-químicas, se tendrá que $p < p_o$. Su valor está pues comprendido entre 0 y 1 ($0 \leq a_w \leq 1$).

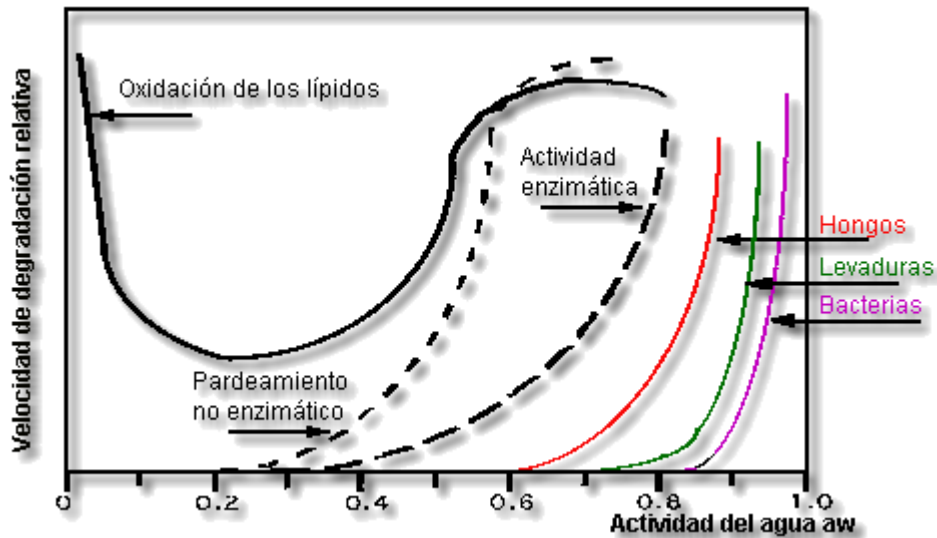


Figura 2.1. Gráfica de estabilidad de los alimentos. Velocidad relativa de las reacciones degradativas en función de la actividad del agua. (Labusa, 1970).

2.3.2 MOVIMIENTO MIGRATORIO DEL AGUA

La deshidratación es el resultado del movimiento de la humedad, desde el interior hasta la superficie húmeda del producto, donde se evapora y va hacia el medio circundante.

El agua contenida en un alimento se encuentra bajo tres formas diferentes que son:

- **Agua libre o absorbida**, es el agua depositada en la superficie del producto. No está vinculada con las moléculas de la sustancia absorbente, salvo que las utiliza como estructura de apoyo.
- **Agua de adsorción**, es aquella unida más firmemente a la materia seca. Si el contenido de humedad es menor, más fuerte es la unión entre a sustancia y el agua, y menor la influencia que ésta ejercerá sobre la atmósfera circundante.

- **Agua de constitución**, es la que forma parte de la materia celular del producto, por lo que no puede ser eliminada fácilmente.

El movimiento de agua durante la deshidratación de un producto es realizado por varias fuerzas que pueden actuar simultáneamente. Estas fuerzas son:

- **Fuerzas capilares**, son aquellas que ocasionan el movimiento del agua libre de una célula a otra.

Durante el secado, las diferencias entre las presiones parciales de vapor de la atmósfera y del agua contenida en un producto dan lugar, en primera instancia, a la evaporación del agua presente en las capas superficiales (agua libre), mientras que las capas internas permanecen aún húmedas.

La evaporación del agua de las capas superficiales origina una *fuerza de atracción o arrastre* sobre el agua libre de las células adyacentes. El flujo capilar originado por esta fuerza de arrastre hace que el agua libre del interior se mueva de una célula a otra buscando la superficie del producto.

- **Fuerzas por diferencias en la presión del vapor**, una vez cesada la atracción capilar, las cavidades celulares casi solo contienen aire y vapor de agua, generándose una presión de vapor que se incrementa a medida que aumente el contenido de vapor en dichas cavidades, alcanzando su máximo valor hacia el centro del producto y decreciendo hacia la superficie.

Esta diferencia de presión de vapor entre la parte central y la superficie del producto se denomina *gradiente de presión de vapor*, y ocasiona que la humedad del producto, en estado de vapor, migre de las zonas interiores hacia las zonas exteriores que tienen una presión de vapor menor.

- **Fuerzas por diferencias en el contenido de humedad**, debido a la diferencia que se produce entre el contenido de humedad en el centro y la superficie del producto se denomina *gradiente de humedad*, y provoca el movimiento interno

del agua, haciendo que la humedad se desplace desde las zonas interiores más húmedas hacia la superficie que se encuentra más seca.

Mientras más grande sea el gradiente de humedad, es decir, mientras más grande sea la diferencia entre el contenido de humedad en el centro y la superficie, más rápido se secará el producto y viceversa.

2.3.3 INFLUENCIA DEL SECADO EN LA CALIDAD DE LOS ALIMENTOS.

Por lo general la deshidratación produce cambios físicos, químicos y sensoriales en los alimentos⁶. Entre los cambios físicos están el encogimiento, endurecimiento y la termoplasticidad. Los cambios químicos contribuyen a la calidad final, tanto de los productos deshidratados como de sus equivalentes reconstituidos, por lo referente al color, sabor, textura, viscosidad, velocidad de reconstitución, valor nutritivo y estabilidad en el almacenamiento. Con frecuencia estos cambios ocurren solo en determinados productos, pero algunos de los principales tienen lugar en casi todos los alimentos sometidos a deshidratación, y el grado en que ocurren depende de la composición del alimento y la severidad del método de secado.

Las reacciones de oscurecimiento pueden deberse a oxidaciones enzimáticas, por lo que se recomienda inactivarlas mediante tratamientos de pasterización o escaldado.

El oscurecimiento también puede deberse a reacciones no enzimáticas. Estas se aceleran cuando los alimentos se someten a altas temperaturas y el alimento posee elevada concentración de grupos reactivos y el secado alcanza niveles del 15 a 20%. Cuando se superan los niveles de deshidratación como el 2% los cambios en el color son menos intensos.

Otra consecuencia de la deshidratación de alimentos es la dificultad en la rehidratación. Las causas son de origen físico y químico, teniendo en cuenta por una parte el encogimiento y la distorsión de las células y los capilares y por otra, la

⁶ Potter., N.N.,1978 "La Ciencia de los Alimentos". 2 Edición. Edutex. S.A. México 13 D.F.

desnaturalización de las proteínas ocasionada por el calor y la concentración de sales. En estas condiciones estas proteínas de las paredes celulares no podrán absorber tan fácil de nuevo el agua, perdiendo así la turgencia y alterando la textura que caracteriza a un determinado alimento.

La pérdida parcial de componentes volátiles y de sabor es otro efecto de la deshidratación. Por esto algunos métodos emplean atrapar y condensar los vapores producidos en el secador y devolverlos al producto secado. Otras técnicas usan agregar esencias y saborizantes que derivan de otras fuentes, o bien agregando gomas u otros compuestos que reducen las pérdidas de sabor y aroma.

Los factores analizados se tienen en cuenta cuando se va a diseñar un equipo de deshidratación de alimentos. Todo debe tender a lograr la máxima velocidad del secado, con el mínimo de daño al alimento al costo más bajo. Para esto se debe trabajar en forma interdisciplinaria para conseguir resultados óptimos.

El punto crítico es que el material biológico que son los alimentos nunca es completamente homogéneo y tiende a comportarse de manera diferente debido a que es diferente su composición inicial, cantidad y características del agua que posee; los patrones de encogimiento, migración de solutos y más importante, que cambian sus propiedades a lo largo de la operación de secado.

Por todo lo anterior es definitivo combinar unas buenas condiciones de proceso, equipos adecuados y experiencia con los productos a deshidratar.

2.3.4 TÉCNICAS DE SECADO

Es muy importante elegir el método de deshidratación⁷ más adecuado para cada tipo de alimento, siendo los más frecuentes: la deshidratación al aire libre, por rocío, por aire, al vacío, por congelación y por deshidrocongelación.

⁷ Desrosier., N.W. 1963 "The Technology of Food Preservation" AVI Publishing Co., Westport, Conn.

También es vital conocer la velocidad a la que va a tener lugar el proceso, ya que la eliminación de humedad excesivamente rápida en las capas externas puede provocar un endurecimiento de la superficie, impidiendo que se produzca la correcta deshidratación del producto.

Los factores que influyen en la elección del método óptimo y de la velocidad de deshidratación más adecuada son los siguientes:

- Características de los productos a deshidratar: actividad del agua para distintos contenidos de humedad y a una temperatura determinada, resistencia a la difusión, conductividad del calor, tamaño efectivo de los poros, etc.
- Conductividad del calor.
- Características de las mezclas aire/vapor a diferentes temperaturas.
- Capacidad de rehidratación o reconstrucción del producto después de un determinado tiempo de almacenamiento.

- **DESHIDRATACIÓN AL AIRE LIBRE**

Está limitada a las regiones templadas o cálidas donde el viento y la humedad del aire son adecuados.

Generalmente se aplica a frutas y semillas, aunque también es frecuente para algunas hortalizas como los pimientos y tomates.

- **DESHIDRATACIÓN POR AIRE**

Para que pueda llevarse a cabo de forma directa, es necesario que la presión de vapor de agua en el aire que rodea al producto a deshidratar, sea significativamente inferior que su presión parcial saturada a la temperatura de trabajo.

Puede realizarse de dos formas: por partidas o de forma continua, constanding el equipo de: túneles, desecadores de bandeja u horno, desecadores de tambor o giratorios y desecadores neumáticos de cinta acanalada, giratorios, de cascada, torre, espiral, lecho fluidificado, de tolva y de cinta o banda. Estos equipos están diseñados de forma que suministren un elevado flujo de aire en las fases iniciales del proceso, que luego se va reduciendo conforme se desplaza el producto sometido a deshidratación. Así, por ejemplo, para porciones de hortalizas es común que se

aplique un flujo de aire con una velocidad de 180-300 metros por minuto, con temperaturas en el aire del bulbo seco del termómetro de 90-100 °C y temperaturas en bulbo húmedo inferiores a 50 °C. Posteriormente, conforme va descendiendo el contenido de humedad, se reduce la velocidad del flujo del aire y la temperatura de desecación desciende a 55 °C e incluso menos, hasta que el contenido de humedad resulta inferior al 6%.

En los desecadores de lecho fluidificado y aerotransportadores o neumáticos, la velocidad del aire debe ser suficiente para elevar las partículas del producto a deshidratar, determinando que se comporten como si de un líquido se tratase. Este método se emplea para productos reducidos a polvo, para productos de pequeño tamaño y para hortalizas desecadas.

- **DESHIDRATACIÓN POR ROCÍO**

Los sistemas de deshidratación por rocío requieren la instalación de un ventilador de potencia apropiada, así como un sistema de calentamiento de aire, un atomizador, una cámara de desecación y los medios necesarios para retirar el producto seco. Mediante este método, el producto a deshidratar, presentado como fluido, se dispersa en forma de una pulverización atomizada en una contracorriente de aire seco y caliente, de modo que las pequeñas gotas son secadas, cayendo al fondo de la instalación. Presenta la ventaja de su gran rapidez.

- **DESHIDRATACIÓN AL VACÍO**

Este sistema presenta la ventaja de que la evaporación del agua es más fácil con presiones bajas.

En los secadores mediante vacío la transferencia de calor se realiza mediante radiación y conducción y pueden funcionar por partidas o mediante banda continua con esclusas de vacío en la entrada y la salida.

- **DESHIDRATACIÓN POR CONGELACIÓN**

Consiste en la eliminación de agua mediante evaporación directa desde el hielo, y esto se consigue manteniendo la temperatura y la presión por debajo de las

condiciones del punto triple (punto en el que pueden coexistir los tres estados físicos, tomando el del agua un valor de 0,0098 °C).

Este método presenta las siguientes ventajas: se reduce al mínimo la alteración física de las hortalizas, mejora las características de reconstitución y reduce al mínimo las reacciones de oxidación y del tratamiento térmico.

Cuando se realiza la deshidratación mediante congelación acelerada se puede acelerar la desecación colocando el material a deshidratar entre placas calientes.

- **DESHIDROCONGELACIÓN**

La deshidrocongelación es un método compuesto en el que, después de eliminar aproximadamente la mitad del contenido de agua mediante deshidratación, el material resultante se congela con rapidez. Los desecadores empleados son los de cinta, cinta acanalada y neumáticos, siempre que la deshidratación se produzca de forma uniforme.

Las ventajas de este sistema son las siguientes: reduce en gran medida el tiempo necesario para la deshidratación y rehidratación y reduce aproximadamente a la mitad el espacio requerido para el almacenamiento del producto congelado. Sin embargo, el aspecto final del producto, que aparece arruga, no es muy agradable para el consumidor.

2.3.5 PREPARACIÓN DE LOS PRODUCTOS PARA EL SECADO

La efectividad de los tratamientos de conservación de los alimentos depende de su carga microbiana, cuando más elevada sea más difícil es que sean efectivos, es necesario por tanto en todo momento evitar el incremento de la contaminación antes de la conservación.

Es necesario por tanto realizar un lavado de los productos a secar, con el fin de garantizar una higiene constante para evitar todo desarrollo de microorganismos, se recomienda el lavado y remojo con agua clorada seguido de un enjuagado con agua limpia.

En cuanto a la preparación de los productos hay que encontrar un compromiso entre la presentación final y la facilidad de secado. Como regla general, interesa aumentar la superficie de intercambio aire/producto (trozos pequeños colocados en el secador sin que se toquen en capas delgadas), así se disminuye la duración de la primera fase y el secado es efectivo.

Sin embargo, a veces es difícil tomar estas medidas, como por ejemplo en el caso del secado de cereales, que se tratan en capa gruesa y tienen un comportamiento complejo. Por lo que se da un pretratamiento a los productos a secar; entre los que anotamos:

- **Escaldado**, sobre todo en vegetales y carnes, que permite ablandar los productos, fijar los colores, eliminar los gases intracelulares responsables de reacciones de oxidación y destruir las enzimas que pueden provocar alteraciones.
- **Sulfitado**, utilizado en hortalizas y frutas. Favorece la conservación del color del producto, limitando el pardeamiento. También tiene acción microbiana.
- **Salazón**, para carnes y pescados, impide, por disminución de la actividad del agua del producto, la proliferación microbiana.
- **Ahumado**, también para carnes y pescados, permite un secado y una acción específica del humo, por la producción de compuestos antisépticos, aromas y colores particulares.

2.3.6 ALMACENAMIENTO Y ENVASADO DE PRODUCTOS DESHIDRATADOS

Cuando los productos deshidratados se almacenan a granel⁸, lo más apropiado es utilizar contenedores herméticos con un gas inerte, como el nitrógeno. Si se trata de

⁸ Hanlon, J.F. Handbook of Package Engineering. TS 195 H35 1998

partidas pequeñas, lo mejor para maximizar la vida útil es usar envases con buenas propiedades barrera para el oxígeno, el vapor de agua y la luz.

Funciones del empaque:

- Contener, llevar, dispensar
- Proteger de la contaminación
- Proteger del oxígeno, luz, humedad
- Proteger de daño mecánico
- Medir
- Promover el producto, comunicar información, motivar la compra

Materiales de empaque: Promedio 22% precio venta



Figura 2.2. Materiales de empaque

Empaque y embalaje

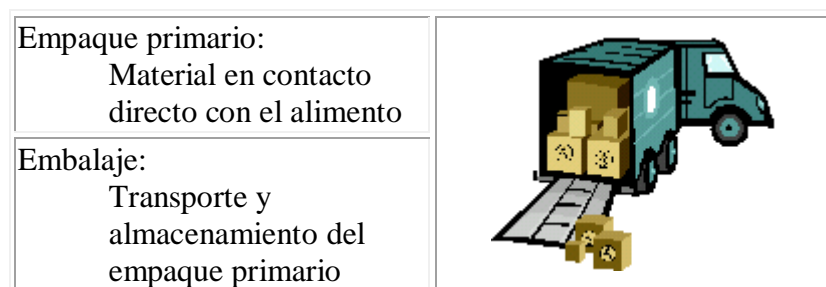


Figura 2.3. Empaque y embalaje

Información en el empaque

- Nombre descriptivo y nombre comercial
- Advertencias sobre posibles riesgos
- Lista de ingredientes requerida por ley
- Fecha expiración (si requerida por ley)
- Nombre y dirección del fabricante
- Contenido neto
- Direcciones para uso

CAPÍTULO 3

PRODUCTOS A SECAR

Las frutas que vamos a secar son manzana, uvilla y durazno, frutas que se producen en el Ecuador por lo que hemos pensado en encontrar nuevas formas de llevarlas a la venta que nos de un valor agregado sobre lo que ofrecen otros países. Así pues a continuación daremos una breve descripción de cada una de ellas en lo que respecta a su procedencia, lugar de cultivo en el país y sus características tanto físicas como químicas.

3.1 MANZANA

La manzana es de la familia de las Rosáceas y su nombre científico es “Pyrus Malus”. Es el fruto de unos pequeños árboles, originarios de Europa, el oeste del Turkenistán y el sudoeste y centro de Asia. Existen incontables variedades de manzanas por todo el mundo. Es una gran fuente de vitamina C, contiene fibra, antioxidantes, guercetina, ácido elágico, ácido cafeico, potasio, fósforo, calcio, hierro, vitamina A, B1, B2, B6, vitamina e, ácido fólico y niacina.

En Ecuador son cultivadas en las provincias de Tungurahua, Chimborazo, Cañar, Azuay y Loja. Algunas de las variedades cultivadas en el Ecuador son: Golden Delicius, Emilia, Tortera, Red Jonathan.

3.1.1 ORIGEN Y VARIEDADES

Antiguamente la manzana estaba situada en un lugar honorífico con respecto a muchos otros alimentos y era parte del alimento diario de la gente del campo que se alimentaba solamente con lo que la tierra le daba. Esta fruta era conservada de maneras muy diversas para mantener su estado y su contenido alimenticio, pues en tiempos en que no existían congeladores, ni refrigeradores, las gentes de aquellos tiempos no querían privarse de manzanas.

Para conservarlas, por ejemplo, se elegía un sitio seco, y de ventilación discreta, colocando en el suelo una capa de 10 centímetros de espesor de paja de centeno y sobre ésta, una capa de manzanas con un espacio entre sí. Luego se espolvoreaba con yeso y encima se acomodaba nuevamente otra capa de paja de centeno a la que se le agregaba otra camada de frutas, espolvoreándose con yeso y nuevamente otra capa de paja de centeno. Así se hacían unas 5 o 6 capas. De esta manera, las manzanas eran conservadas por mucho tiempo y se mantenían frescas y saludables aún.

Hoy en día, los métodos han cambiado y las cámaras frigoríficas reemplazaron aquellos métodos de probada eficacia en su momento, pero cabe destacar que las cámaras de frío que se utilizan en la actualidad, muchas veces provocan ciertos cambios en la fruta que no son recuperables.

La facilidad de adaptación de este árbol a diferentes climas y suelos, el valor nutritivo de sus frutos y la resistencia a las más bajas temperaturas permiten cultivarlo a gran escala en todos los países de clima relativamente frío.

Existen más de mil variedades de manzanas en todo el mundo, pero la gama que nos ofrece el mercado es limitada, ya que tan sólo podemos elegir entre poco más de media docena de variedades tales como:

- Early Red One
- Top Red
- Red Delicious

- Starking
- Royal Gala
- Granny Smith
- Golden Supreme
- Golden Delicious
- Reineta gris del Canadá
- Machintosh

3.1.2 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

- **Forma:** son pomos por lo general de forma ovoide, a veces alargados o redondos, que esconden numerosas semillas de color pardo en su interior. Su piel es casi siempre brillante y lisa.
- **Tamaño y peso:** las manzanas más comercializadas son aquellas cuyo calibre va desde los 75 milímetros hasta los 85 o más. y su peso oscila desde 170 gramos hasta 250 gramos.
- **Color:** los diferentes colores de la piel hacen que se diferencien las frutas en cuatro grupos: verdes, rojas, amarillas y bicolors. Todas ellas con sabores, aromas y calidad de su carne diferentes.
- **Sabor:** la pulpa puede ser dura o blanda, pero siempre refrescante y jugosa, y su sabor va desde el muy dulce al muy ácido pasando por toda una mezcla de gustos acidulados y azucarados. La carne es más o menos aromática según la variedad.

3.1.3 COMPOSICIÓN QUÍMICA

Es conveniente saber que la manzana debe ser consumida en su totalidad para aprovechar sus poderes energéticos y vigorizantes, la cáscara y el corazón de la manzana contienen grandes propiedades benéficas para el organismo que hacen de la misma un alimento muy completo. La manzana tiene un bajo contenido de proteínas, grasas y sodio. Ayuda contra el estreñimiento por su fibra y ayuda contra la diarrea si se

ralla y deja oxidar, al oxidarse la pectina se hace presente. También limpia los dientes al comerla a mordidas, así como fortalece las encías.

La composición química promedio entre las diferentes variedades más comercializadas, es la siguiente:

Tabla 3.1. Composición química promedio de la manzana

COMPONENTE	PORCENTAJE DE COMPOSICIÓN
Potasio	35,40 %
Calcio	26,10 %
Magnesio	9,10 %
Sodio	26,10 %
Acido Fosfórico	14,00 %
Acido Sulfúrico	6,09 %
Silicato	4,32 %

3.2 DURAZNO

El árbol de durazno pertenece a la familia de las Rosáceas. Esta familia incluye más de 2.000 especies de plantas herbáceas, arbustos y árboles distribuidos por regiones templadas de todo el mundo. Existen cientos de variedades que se han agrupado en cinco razas, cada una de ellas con características, periodo de maduración y aplicaciones propias. Las nectarinas y los paraguayos son de los más conocidos.

3.2.1 ORIGEN Y VARIEDADES

El durazno es originario de China, donde las referencias a su cultivo se remontan a 3.000 años atrás. En China los duraznos son un símbolo de larga vida e inmortalidad y constituyen un motivo habitual en la decoración de las famosas

porcelanas del país. Fueron llevados a Persia (Irán) a través de las rutas comerciales de las montañas, llegando a ser conocidos como fruta Pérsica. En el año 330 a.C. el durazno llegó a Grecia y durante la edad media su cultivo se extendió por toda Europa, asentándose como cultivo en expansión durante el siglo XIX.

Actualmente son países productores: China, Estados Unidos, Argentina, Chile, Grecia, Francia y España. Las variedades más comercializadas son:

- **Baby Gold**
- **May Crest**
- **Quee Crest**
- **Merryl**
- **Elegant lady**
- **Alexandra**
- **María blanca**
- **Mireille**
- **Red wing**
- **Royal Glory**

3.2.2 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

- **Forma:** el durazno es de forma redondeada de gran tamaño. Todos ellos, albergan un hueso en su interior que guarda la semilla y que en algunas variedades está muy adherido a la pulpa y en otras se separa con facilidad.
- **Tamaño:** el calibre varía según la variedad, desde los 55-65 milímetros hasta los 75-85.
- **Color y textura:** la piel del durazno es lisa y aterciopelada, su color es rojo intenso, rosa pálido o amarillo anaranjado, según la variedad. La pulpa es carnosa, dulce y jugosa, unas veces blanca, compacta y muy dulce y en otras variedades, roja o anaranjada, blanda y menos dulce.
- **Sabor:** según la variedad, pasa por una extensa gama de dulces y puede ser ligeramente acidulado.

3.2.3 CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS

Al contrario de lo que pueda parecer debido a su sabor dulce, el melocotón no es de las frutas que más hidratos de carbono y energía aportan. Destaca su riqueza de fibra, que mejora el tránsito intestinal. Entre su composición mineral sobresale el potasio, y en cantidades discretas, el magnesio y el yodo.

El abanico de vitaminas hidrosolubles que contiene es amplio, sin destacar tampoco en este caso ninguna vitamina en concreto. La cantidad de carotenos si que es más alta que la de otras frutas, lo que le confiere parte de sus propiedades dietoterapéuticas. La nectarina contiene más cantidad de carbohidratos que el melocotón y aporta un valor energético mayor. También posee más cantidad de carotenoides, vitamina C y potasio. La provitamina A o beta caroteno se transforma en vitamina A en nuestro organismo conforme éste lo necesita. Dicha vitamina es esencial para la visión, el buen estado de la piel, el cabello, las mucosas, los huesos y para el buen funcionamiento del sistema inmunológico y tiene acción antioxidante. El potasio es un mineral necesario para la transmisión y generación del impulso nervioso y para la actividad muscular normal, interviene en el equilibrio de agua dentro y fuera de la célula.

Tabla 3.2. Composición por 100 gramos de porción comestible de durazno

COMPONENTE	CANTIDAD
Calorías	37 (Kcal)
Hidratos de Carbono	9 (g)
Fibra	1,4 (g)
Potasio	140 (mg)
Magnesio	9 (mg)
Yodo	3 (mcg)

Vitamina C	8 (mg)
Provitamina A	17 (mcg) *

*mcg = microgramos

3.3 UVILLA

La uvilla fue una fruta conocida por los incas y su origen se atribuye a los valles bajos andinos de Perú y Chile. La uvilla ha sido una fruta casi silvestre y de producción artesanal, hasta hace unos pocos años en que el mercado nacional y la posibilidad de exportaciones han incidido para que se la cultive comercialmente. El cultivo se ha extendido a casi toda la serranía, con buenas posibilidades, en especial bajo invernadero, en donde se pueden obtener buenos rendimientos y sobre todo calidad.

El Ecuador exporta esta fruta a los mercados del hemisferio norte con buenas perspectivas de incremento de volúmenes. Un aspecto que todavía no se ha explotado en el Ecuador, es la posibilidad de la extracción de calcio, por el altísimo contenido de este mineral que tiene la fruta.

A la uvilla se la conoce con varios nombres en los diferentes países de América y Europa. Sin embargo, en el mercado internacional en general se la conoce como physalis. Así, en Perú se la llama también capulli, motojobobo embolsado o capulí en Bolivia, topotopo o chuchuva en Venezuela, capulí o amor en bolsa en Chile, cereza del Perú en México, poha en Hawaii, etc. En Estados Unidos se le han asignado varios nombres, como ground / andean cherry, huso tomato. En España la llaman alquequenje, en Alemania judaskirsche y en Francia coqueret du perou. También se la conoce como Cap Berry, Andean Cherry, Hust Tomato o Cap Goosberry.

Las zonas de mayor aptitud para este cultivo en el Ecuador se ubican en el callejón interandino: Mira, Otavalo, Cotacachi, Puenbo, Salcedo, Píllaro, Ambato, Patate, Guamote, Biblian, Cuenca.

Existen tres variedades de uvillas, la **Golden** que es de color amarillo - anaranjado, la **Keniana** de color verde claro y la **Lojana** que es amarilla pero más pequeña que la Golden.

3.3.1 ALTERNATIVAS DE PROCESAMIENTO AGROINDUSTRIAL Y CONSUMO

Las presentaciones de uvilla procesada más frecuentes son: fruta congelada IQF, puré, pulpa, mermeladas, conservas, deshidratada (como pasas). El mayor valor de mercado está en la fruta fresca o en los elaborados que mantienen su forma intacta. El alto contenido de pectina en la uvilla la hace especialmente apropiada para mermeladas y salsas.

La uvilla se puede consumir fresca cuando está totalmente madura. Esta fruta exótica se utiliza para preparar conservas, salsas, “chutneys”, helados, glaceados y postres variados. Es un ingrediente muy atractivo para ensaladas de frutas y vegetales, diferentes platos gourmet, cocktails y licores. Los ingleses consumen la uvilla azucarada y servida en su capuchón. En Europa algunos restaurantes de especialidades gourmet utilizan la uvilla, fresca o seca, como adorno.

3.3.2 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

La fruta es redonda - ovoide, del tamaño de una uva grande, con piel lisa, cerácea, brillante y de color amarillo – dorado – naranja; o verde según la variedad. Su carne es jugosa con semillas amarillas pequeñas y suaves que pueden comerse. Cuando la flor cae el cáliz se expande, formando una especie de capuchón o vejiga muy fina que recubre a la fruta. Cuando la fruta está madura, es dulce con un ligero sabor agrio. Tiene un diámetro de 1,25 a 2 centímetros.

3.3.3 CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS

Se considera a la fruta madura una buena fuente de vitaminas A y C y pectina. Dadas sus propiedades curativas y tranquilizantes, se utilizan tanto las hojas como el fruto en la industria química y farmacéutica.

Tabla 3.3. Composición nutricional de la uvilla

Componentes	Contenido de 100 g de la parte comestible	Valores diarios recomendados (basado en una dieta de 2000 calorías)
Humedad	78.90%	
Carbohidratos	16 g	300 g
Ceniza	1.01 g	
Fibra	4.90 g	25 g
Grasa total	0.16 g	66 g
Proteína	0.05 g	
Acido ascórbico	43 mg	60 mg
Calcio	8 mg	162 mg
Caroteno	1.61 mg	5 000 IU
Fósforo	55.30 mg	125 mg
Hierro	1.23 mg	18 mg
Niacina	1.73 mg	20 mg
Riboflavina	0.03 mg	1.7 mg

CAPÍTULO 4

ALTERNATIVAS DE SECADO

4.1 EQUIPOS PARA EL SECADO DE ALIMENTOS

Los métodos de secado se han desarrollado alrededor de los requerimientos específicos de cada producto. Por esta razón el proceso tiene lugar de muchas formas y se utilizan diferentes clases de equipos. En general, la deshidratación se conduce según dos métodos básicos: proceso adiabático y no adiabático. En el proceso adiabático, el calor de vaporización es suministrado por el calor sensible del aire en contacto con el producto a secar.

En el proceso no adiabático, el calor de evaporización es aportado por el calor radiante o por el calor transferido a través de paredes en contacto con el material a secar. En todos los métodos de deshidratación, el alimento a secar se debe poner en contacto con un medio, que con frecuencia es aire, para eliminar la humedad del producto y sus alrededores. Basándonos en la influencia de la transferencia de materia de la transmisión de calor, se deduce que el sistema de deshidratación más eficaz será aquel que mantenga los máximos valores posibles de los gradientes de presión de vapor y de temperatura entre el aire y el interior del producto a deshidratar.

La diversidad de productos alimentarios existentes ha llevado a desarrollar muchos tipos de secadores para la industria alimentaria, que cumplen las condiciones antes citadas junto con altos valores de los coeficientes de convección en la superficie del producto.

La selección de un tipo particular de secador y, por tanto, de método de secado, depende de una serie de factores entre los cuales se incluye la forma de las materias

primas y sus propiedades, la forma física deseada y las características del producto, las condiciones necesarias de operación y los costes de la misma.

Mientras que el secado al sol se practica todavía para algunas frutas tales como ciruelas, uvas y dátiles, el proceso de deshidratación atmosférica se utiliza para manzanas, ciruelas y varias hortalizas. Los procesos continuos, tales como túnel, cinta y lecho fluidizado son principalmente utilizados para hortalizas. El secado por atomización es aconsejable para zumos de frutas concentrados y leche y el proceso de deshidratación a vacío es útil para frutas de baja humedad y alto contenido de azúcar.

A continuación se exponen las principales características de estos sistemas de deshidratación y los diferentes tipos de secadores utilizados.

4.1.1 SECADO AL SOL

La utilización del calor radiante del sol para evaporar la humedad de los alimentos es el método de secado más antiguo y extendido por todo el mundo. Sin embargo, el secado al aire presenta muchas limitaciones para producciones a gran escala, entre estas se pueden citar los elevados costes de mano de obra, la necesidad de grandes superficies, ausencia de posibilidades de control del proceso de secado, infestación por insectos, posible degradación de los alimentos debida a reacciones bioquímicas y desarrollo de microorganismos, debido entre otras cosas a los largos tiempos de secado. Entre las ventajas de la energía solar la más importante es que se trata de una energía libre, no contaminante, renovable y abundante que no puede ser monopolizada y satisface los requerimientos globales para el Desarrollo Sostenible. Por esta razón en los últimos años se han realizado numerosos intentos para desarrollar el secado solar principalmente para la conservación de productos agrícolas y forestales.

El método tradicional de secado al sol consiste en distribuir el producto en una capa fina sobre una superficie uniforme. El producto se remueve y voltea periódicamente durante el secado. La temperatura del producto durante el secado al sol oscila entre 5 y 15°C por encima de la temperatura ambiente y el tiempo de secado puede alcanzar 3-4 semanas, por ejemplo para uvas y albaricoques. Las características

del producto: color, forma y las condiciones de humedad iniciales y finales deseadas influyen sobre la temperatura del producto y el tiempo de secado.

El secado al sol es ampliamente utilizado para el secado de granos, también en frutas y algunas hortalizas.



Figura 4.1. Secado al sol

4.1.2 SECADO SOLAR

El método simple de secado utilizando directamente el sol presenta muchos problemas, tales como lluvia o tiempo nublado, contaminación por polvo, por insectos o por pájaros, y la posibilidad de deterioro por desarrollo de microorganismos y de reacciones químicas y enzimáticas, debido a los largos tiempos de secado. Por esta razón se han desarrollados otros métodos de secado que permiten utilizar la radiación solar como fuente de energía en mejores condiciones.

Ahora bien, la utilización de la radiación solar para un secado planificado presenta varias dificultades. Un problema básico es el carácter periódico de esta radiación, lo que ha llevado a pensar en la posibilidad de almacenar parte de la energía obtenida durante los periodos de insolación, por medio de dispositivos de acumulación del calor. Además, incluso en los periodos de radiación pueden producirse dificultades, la intensidad de la radiación incidente es función del tiempo, esto lleva a la necesidad de un adecuado control estratégico y de los medios necesarios para este control. Otro

problema es el causado por la baja densidad energética de la radiación solar, que requiere grandes superficies de acumulación de energía.

La naturaleza de la radiación solar presenta problemas innatos que requieren medios para su solución tales como acumuladores de calor, fuente auxiliar de energía, sistema de control y gran superficie en colectores solares y en consecuencia los costes en inversiones son evidentemente mayores que en el secado al sol. Por lo tanto la energía solar puede ser utilizada económicamente para el secado sólo si su objetivo se puede coordinar con las características específicas de la radiación solar, así la situación geográfica que afecta al número de días de sol al año y a la intensidad de la radiación incidente proporciona aumentos de energía en algunas zonas.

Las ventajas, citadas antes, de la energía solar han hecho que este tipo de secaderos despierten de nuevo interés, siendo muchos los estudios que se están realizando para mejorar su eficiencia.

La energía solar se utiliza para secar indirectamente granos, frutas, tales como uvas, ciruelas, dátiles e higos, y forrajes, por ejemplo alfalfa. Los secaderos solares difieren en el modo de calentamiento o en la forma en que se utiliza el calor procedente de la radiación solar.

La parte funcional más importante de un secadero solar es el espacio de secado, donde tiene lugar el proceso. En los secaderos solares que reciben directamente la radiación, el material a secar absorbe directamente la energía, en este caso, el espacio de secado tiene una cubierta transparente. En los secaderos por convección, el medio de secado es aire precalentado por la energía solar en un colector, que convierte la radiación solar en calor. En los sistemas directos de transmisión de calor, el fluido de trabajo del colector solar es el propio aire de secado. En el caso de sistemas indirectos, el fluido de trabajo es un líquido (por ejemplo, agua) y se utiliza un intercambiador de calor líquido-aire para precalentar el aire de secado.

Los secaderos solares se clasifican en tres grupos principales, según el tipo de energía utilizada para el secado y el equipo empleado:

- Secador solar natural.

- Secador solar semiartificial.
- Secador solar asistido.








Tipo de Secador	Descripción	Esquema del Modelo Básico
Cabina (Gabinete) directa	La cámara de secado es de vidrio y no usa un colector solar por separado	
Cabina (Gabinete) indirecta	Se usa un colector solar que esta separado de la cámara de secado y que no tiene superficies transparentes	
Modelo combinado	La cámara de secado esta hecha de vidrio parcial o totalmente, y usa un colector solar por separado	
Túnel	Normalmente se usa un armazón metálico con 1 ó 2 capas de plástico vidriado. Generalmente se trata de un secador directo, pero puede ser indirecto si el plástico de la capa más interna es negro	
Túnel bajo	Secador directo semejante al anterior pero se construye más cercano al suelo y normalmente solo contiene una sola capa de producto	
Tienda	Secador solar con un marco recto en lugar de curvado	
Arcón (bin)	Cualquier secador pero nominalmente indirecto, con flujo de aire forzado por convección que puede secar capas profundas (normalmente 300 mm ó más) de producto.	

Figura 4.2. Tipos de secadores solares⁹

4.1.2.1 Secadores solares naturales

4.1.2.1.1 Secadores solares directos

Son el tipo más sencillo de secadero solar. Generalmente se utilizan para el secado de productos agrícolas, tales como frutas, forrajes y hortalizas. En líneas generales constan de una superficie de secado cubierta por un material transparente, que protege al producto de la lluvia y de la polución. El material a secar se extiende en una capa fina sobre un fondo perforado y es expuesto directamente a la radiación solar.

⁹ Fuller, R.J 1993 Solar Drying of Horticultural Produce: Present Practice and Future Prospects. Postharvest News and Information 4 (5): 131N-126N



Figura 4.3. Secado solar directo

4.1.2.1.2 Secadores solares indirectos¹⁰

En este tipo de secaderos, la radiación solar no incide directamente sobre el producto a secar. El aire se calienta en un colector solar y es conducido a la cámara de secado para deshidratar el producto. Generalmente se utilizan como colectores placas solares para calentar el aire en aplicaciones que utilizan baja y moderada temperatura. La eficiencia de estos colectores depende del diseño y de las condiciones de operación.

En la figura 4.4 aparece el esquema de un secadero de este tipo. El material a secar se coloca sobre estantes perforados situados unos encima de otros. La pared frontal del secadero debe estar orientada al sur y la parte superior tiene una cubierta transparente (vidrio por ejemplo), la pared trasera está aislada térmicamente. tanto esta pared como el fondo están recubiertos por una capa de pintura negra. El aire del ambiente se calienta con un colector plano, unido al fondo de la caja, y fluye por sí solo al espacio de secado. El aire húmedo sale al exterior.

¹⁰ Revista 30Días - Córdoba Argentina - Septiembre 2004

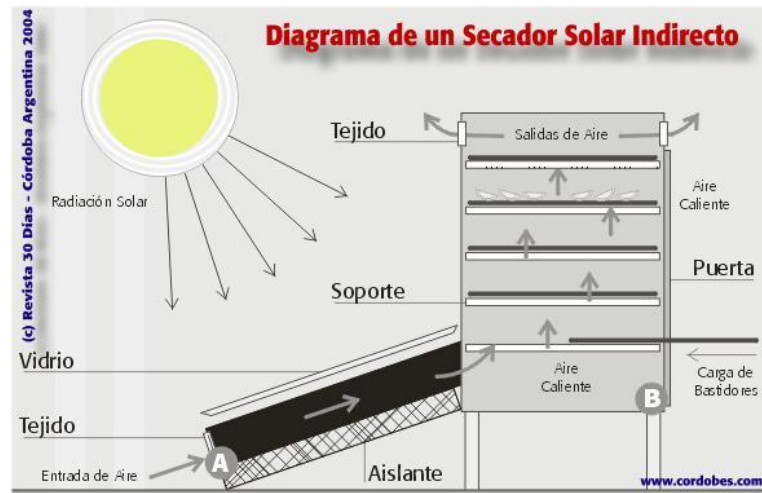


Figura 4.4. Secador solar indirecto

4.1.2.1.3 Secaderos solares semi artificiales

En este tipo de secaderos solares el caudal másico de aire requerido es proporcionado por un ventilador. Uno de los sistemas más extendido para el secado de productos agrícolas es el secadero solar de túnel.

El túnel tiene una cubierta transparente, la primera sección sirve como colector solar para precalentamiento del aire, la superficie del fondo de esta zona está pintada de negro. La siguiente sección del túnel es el espacio de secado, el material a secar se extiende sobre el fondo y recibe directamente la radiación del sol.

La longitud del túnel se puede reducir situando en paralelo el colector y el espacio de secado.

4.1.2.1.4 Secadores solares asistidos

En este tipo de secaderos se puede llevar a cabo un proceso de secado planificado y optimizado para obtener productos de calidad. Se elimina la influencia de las condiciones climatológicas sobre la calidad del producto por la utilización de una fuente de energía independiente.

Se trata de secaderos convencionales a los que se ha añadido equipamiento suplementario, para poder utilizar una proporción significativa de energía térmica que reemplace la energía solar.

La conexión a los secaderos solares de un equipo para almacenamiento físico del calor se justifica principalmente por tres razones:

- El tiempo diario de secado puede ser ampliado a aquellas horas en que no hay sol.
- Se puede prevenir el sobresecado almacenando el exceso de energía solar recogida en los periodos de mayor radiación.
- Se puede controlar la temperatura de secado.

Este almacenamiento de calor se puede realizar por medio de agua. En la figura 4.5 se presenta un esquema de un secadero de este tipo. El fluido de trabajo del colector solar (1) es agua, que circula por medio de una bomba (2) a través de la tubería (3). El agua caliente fluye al tanque de almacenamiento de calor (4). El ventilador (7) toma el aire atmosférico y lo hace pasar por el intercambiador agua-aire (5). El medio primario de intercambio de calor es el agua que circula por medio de la bomba (6) desde el tanque de almacenamiento de calor (4). Se puede utilizar un calentamiento auxiliar del aire (8) si se requiere mantener la temperatura del aire a un valor determinado. El material a secar se coloca en el lecho estático (9).

También se pueden utilizar otros tipos de medios de almacenamiento de calor, por ejemplo material adsorbente, zeolita o gel de sílice, o por medio de bombas de calor.

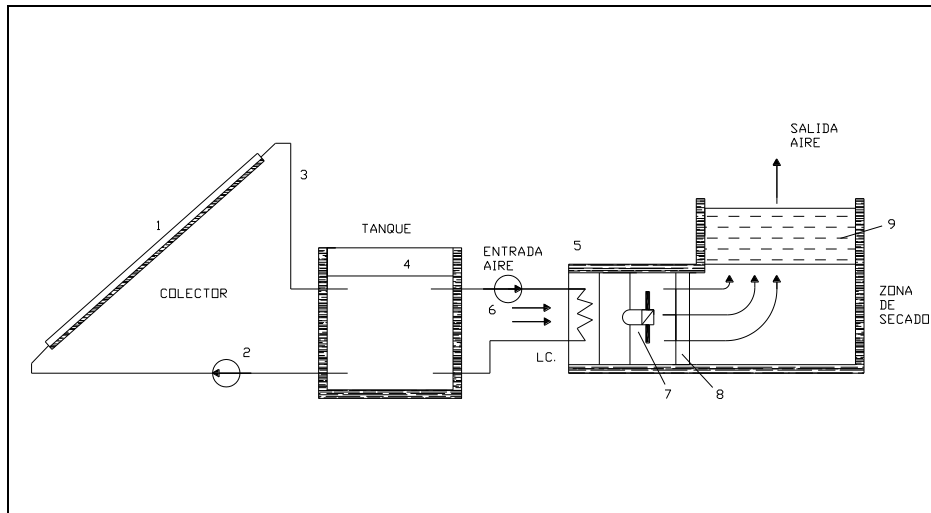


Figura 4.5. Secador solar asistido con almacenamiento de calor por agua.

4.1.3 SECADO POR GASES CALIENTES

En la actualidad la mayor parte de los productos deshidratados, particularmente frutas y hortalizas, se obtienen por medio de esta técnica, que es la más simple y la más económica. Se han diseñado y comercializado diferentes tipos de secaderos basados en este principio.

Con este método, los gases calientes se ponen en contacto con el material húmedo a secar para facilitar la transferencia de calor y de masa, siendo la convección el mecanismo principalmente implicado. Se les llama también, por lo tanto, secaderos directos o por convección. Los gases calientes arrastran fuera del secadero los vapores producidos.

Los gases calientes pueden ser: aire calentado por medio de vapor de agua, gases de combustión y vapor recalentado.

Los factores que afectan a la velocidad y al tiempo total de secado son fundamentalmente cuatro: las propiedades físicas del producto, especialmente el tamaño de partícula y la geometría: su organización geométrica con respecto al aire; propiedades físicas del aire (temperatura, humedad, velocidad) y las características de diseño del secadero (en paralelo, contracorriente, lecho agitado, neumático). La elección

de un método de secado para un producto viene determinada por los atributos de calidad deseados, materia prima y por razones económicas.

Pueden ser continuos o por cargas, siendo el costo de funcionamiento menor en los primeros, los secaderos discontinuos o por cargas se utilizan para bajas capacidades de producción para el tratamiento de productos que exigen una manipulación especial.

En general son aparatos sencillos y de fácil manejo. Son los más utilizados en las industrias agroalimentarias.

En esencia constan de las siguientes partes:

- Recinto, generalmente calorifugado, donde se realiza el secado.
- Sistema de calefacción.
- Sistema de impulsión de aire.

En el esquema de la figura 4.6 se indica una clasificación de los principales tipos de secaderos, según el procedimiento usado en la transmisión de calor.

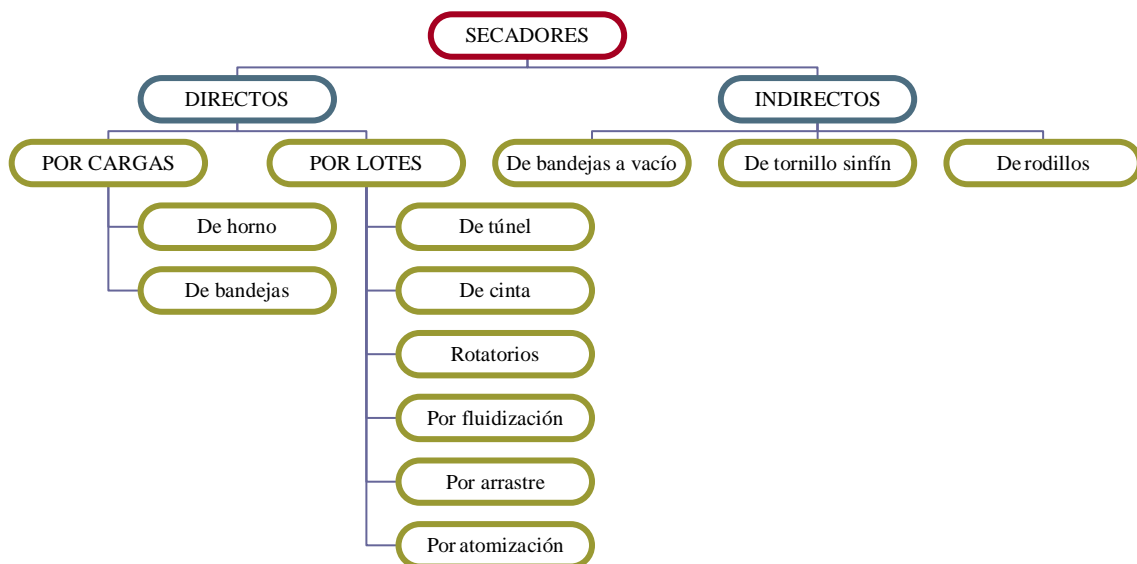


Figura 4.6. Clasificación de los principales tipos de secaderos

4.1.3.1 Secaderos de horno

Son los más simples. Constan de un pequeño recinto de forma paralelepípedica de dos pisos. En el piso inferior se instala el quemador encargado de calentar el aire, que

atraviesa, por convección natural o forzada, el techo perforado sobre el que se asienta el lecho del producto a secar. Su utilización en la industria de alimentos es muy reducida, empleándose para el secado de manzanas, lúpulo y forrajes verdes.

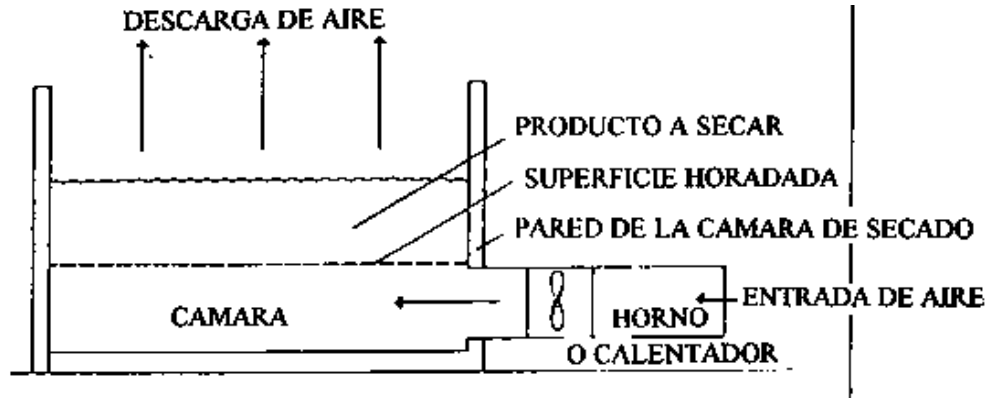


Figura 4.7. Secador de horno¹¹

4.1.3.2 Secadores de bandejas o de armario¹²

Están formados por una cámara metálica rectangular (armario), en cuyo interior se disponen unos bastidores móviles.

Cada bastidor lleva un cierto número de bandejas poco profundas, montadas unas sobre otras con una separación conveniente, colocándose sobre ellas el producto a secar. El ventilador colocado en la parte superior hace circular el aire por los calentadores y después entre las bandejas, con la ayuda de unos deflectores montados convenientemente. El calentador está constituido por un haz de tubos en cuyo interior circula normalmente vapor de agua. Por el conducto de salida se evacua constantemente aire húmedo, mientras que a través de la abertura entra aire fresco. Al final del ciclo de secado, que habitualmente es largo, se sacan del secadero los bastidores para proceder a la descarga del producto seco y a una nueva carga de producto húmedo.

El calor del medio de secado (aire caliente) se transmite al producto por convección; la corriente de convección pasa sobre el producto, no a través del mismo.

¹¹ FAO. 1985. Prevention of Post-Harvest Food Losses: A Training. Manual. Rome: UNFAO. 120 pp

¹² <http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4070035/index.html>

El aire debe circular sobre la superficie del producto, como se ha dicho, a relativamente alta velocidad para aumentar la eficacia de la transmisión de calor y de la transferencia de masa. En la figura 4.7 se representa un esquema de este tipo de secaderos.

La velocidad de aire entre las bandejas varía con el tipo de producto, oscilando normalmente entre 1 y 10 $\text{m}\cdot\text{seg}^{-1}$. Se consiguen velocidades de evaporación de 0,1 a 1 $\text{Kg. de agua}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$, con espesores de lecho entre 10 y 100 mm.

Cuando las características del material y su manejo lo permiten, se utilizan bandejas perforadas, en las que el aire circula a través de la capa de sólidos, con lo que se consigue aumentar la superficie de producto expuesta a la acción del aire, disminuyéndose así el tiempo de secado. A pesar de que de esta forma la velocidad de paso del aire a través del sólido se reduce a 0,6-1 $\text{m}\cdot\text{seg}^{-1}$, la eficiencia del secado aumenta. y se consigue la evaporación de 1 a 10 $\text{Kg. de agua}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$.

Los rendimientos térmicos de estos secaderos suelen estar comprendidos entre el 20 y el 60%, pudiendo ser más bajos. Para mejorar este rendimiento se recircula la mayor parte del aire, introduciéndose aire fresco hasta un 15% del total de aire recirculado.

Los secaderos de bandejas son útiles para secar pequeñas cargas de productos valiosos. En general se aplican cuando la capacidad necesaria no excede de 25 a 50 $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$ de producto seco.

Son secaderos muy utilizados a pequeña escala, en laboratorio y en plantas piloto. Es relativamente fácil ajustar y controlar las condiciones óptimas de secado en el interior del armario, por esta razón se pueden utilizar para deshidratar productos sensibles al calor en pequeñas cargas. Tienen la desventaja de no secar el producto de forma uniforme, dependiendo de su posición en el secadero, por ello, puede ser necesario girar las bandejas durante el proceso para conseguir un secado uniforme.

En este tipo de secaderos se puede tratar prácticamente cualquier producto, alimentos de cualquier tamaño y forma, pero a causa de la mano de obra requerida para la carga y descarga, su operación resulta costosa para su baja capacidad de producción.

Sin embargo, su polivalencia y la buena calidad de los productos obtenidos, los hacen utilizables para deshidratar: zanahorias, espinacas, ajo, perejil, judías verdes, champiñones, cebollas, guisantes, frutas, carne y sus productos, etc.

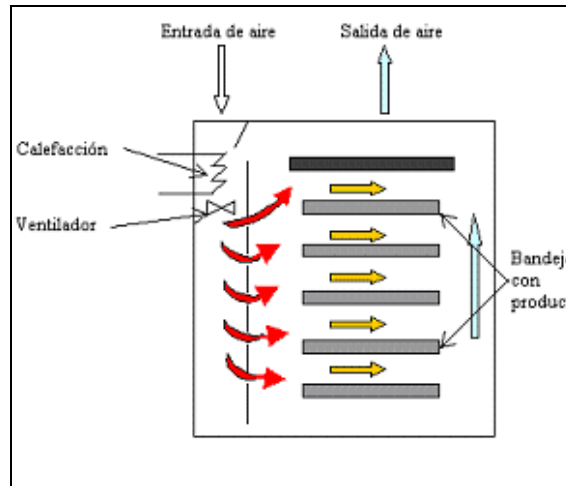


Figura 4.8. Secador de bandejas¹³

4.1.3.3 Secadores de túnel

Los secaderos de túnel pueden presentar configuraciones diferentes pero en general son cámaras de secado rectangulares. Son semejantes a los secaderos de bandejas, pero de funcionamiento semi continuo, para lo cual el producto a secar va colocado también sobre unas bandejas, que son transportadas por el interior del túnel en carretillas, que entran por un extremo con el producto húmedo y salen por el extremo opuesto con el producto seco. Estas carretillas circulan por el túnel a una velocidad determinada para que el tiempo de permanencia del producto en el mismo sea el necesario para lograr el secado deseado. Cuando se introduce una carretilla con producto húmedo, se saca a la vez otra con producto seco, mientras que las restantes adelantan un puesto en la trayectoria. El aire caliente se introduce por un extremo del túnel y circula a una velocidad también predeterminada a través de las bandejas que llevan el producto. Las características de secado de estos equipos están relacionadas con su diseño y especialmente con la dirección relativa del movimiento de las carretillas y del aire. En los, diseños convencionales, el aire circula horizontalmente, en paralelo a la dirección

¹³ <http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4070035/index.html>

del movimiento de las carretillas o transversal a esta dirección. En el primer caso se presentan dos posibilidades: flujo paralelo y en contracorriente. Figura 4.8.

En los sistemas de circulación en paralelo, el producto muy húmedo se expone al aire muy caliente, con lo que la alta evaporación ayuda a mantener baja la temperatura en el producto. En las proximidades de la salida del túnel el producto con baja humedad está expuesto al aire a menor temperatura. En los sistemas en contracorriente, el producto menos húmedo se encuentra expuesto al aire más caliente y el gradiente de temperatura disminuye a medida que nos aproximamos a la entrada del producto en el túnel.

En un mismo túnel puede haber circulación en paralelo al principio y en contracorriente al final del proceso: con este sistema se obtienen las mejores condiciones de secado. Con la circulación en paralelo tiene lugar un secado inicial muy rápido, por desarrollo de un buen gradiente de humedad en el interior de la pieza a secar, mientras que en la circulación en contracorriente, las mejores condiciones de secado se presentan a medida que el alimento se aproxima al extremo de descarga. Así pues, uno de los más utilizados es un equipo que consta de dos túneles en serie, equipado cada uno de ellos con sus propios sistemas de calefacción e impulsión de aire.

En el esquema de un sistema que utiliza la circulación del aire perpendicular al movimiento de avance de las carretillas. En este caso, la presencia de calentadores en cada una de las vueltas posibilita un buen control de la temperatura a lo largo del secadero. Además tiene la ventaja de que en cada etapa cambia el sentido del flujo de aire, lo que determina una distribución más uniforme de la humedad en el producto final.

Los secaderos de túnel son simples y versátiles en comparación con otros, tipos de secaderos, conservan la flexibilidad de los secaderos de bandejas en cuanto a la gama de productos que permiten tratar, en tanto que se adaptan a elevadas capacidades de producción con un funcionamiento prácticamente continuo. Debido a su versatilidad son muy utilizados a gran escala para el secado de varios tipos de alimentos.

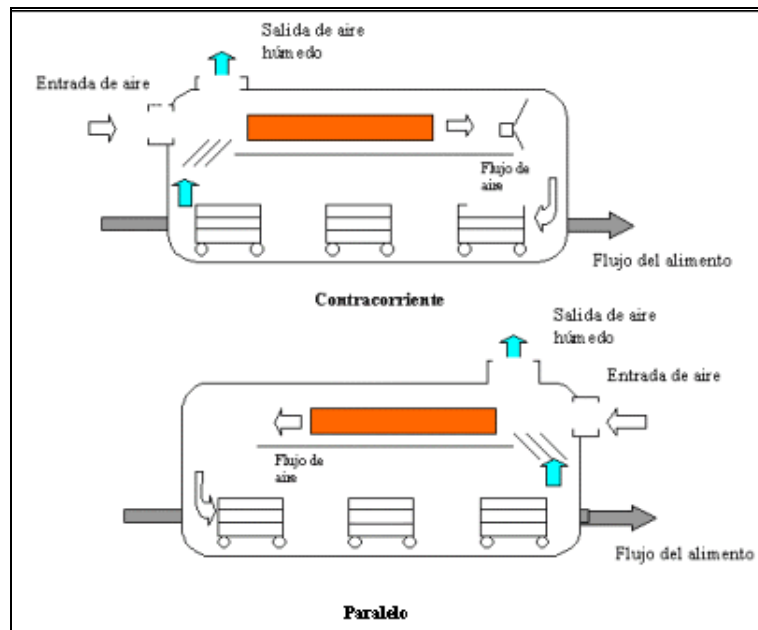


Figura 4.9. Secador de túnel¹⁴

4.1.3.4 Secadores de cinta transportadora

Son secaderos continuos con circulación de aire a través del material, que se traslada sobre un transportador de cinta perforada. Esta cinta suele ser de malla metálica o de lámina de acero perforada. El producto húmedo se carga de forma mecanizada, en un extremo de la cinta, en capas de 10 a 15 cm de espesor. La cinta transportadora, de unos 20 m. de longitud y 0,5 a 2 m de anchura, se desplaza a una velocidad que viene fijada por el tiempo de secado (figura 4.9).

Normalmente el equipo está constituido por secciones en las que la corriente de aire de secado cambia de sentido. Generalmente estas secciones están construidas como módulos independientes, con su propio sistema de impulsión y calefacción, de forma que pueden establecerse en cada una de estas secciones unas condiciones de secado diferentes. En las proximidades del extremo de descarga, el aire suele circular en sentido descendente, con el fin de evitar el arrastre de partículas finas del producto seco.

La construcción del secadero como dos módulos separados, posibilita la mezcla uniforme del producto parcialmente seco al final del primer módulo, y su recarga en capas de mayor profundidad antes de entrar en el segundo módulo, que tiene menor

¹⁴ <http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4070035/index.html>

velocidad de traslación. Esto facilita la obtención de productos de mayor calidad y constituye un ahorro de superficie de cinta en la última sección.

Cuando son necesarios tiempos de secado muy largos, se puede conseguir reducir las dimensiones totales del equipo montando en su interior dos o tres cintas superpuestas.

El calentamiento del aire se consigue normalmente por medio de vapor que condensa en el interior de un haz de tubos, atravesados exteriormente por el aire de secado. También pueden utilizarse gases de combustión para realizar esta calefacción.

Los secaderos de cinta transportadora están concebidos fundamentalmente para el secado a gran escala de un sólo producto a lo largo de su campaña de recolección. Son equipos poco versátiles, es decir, no son adecuados para procesos en los que se deba cambiar frecuentemente la materia prima y, por tanto, las condiciones de secado.

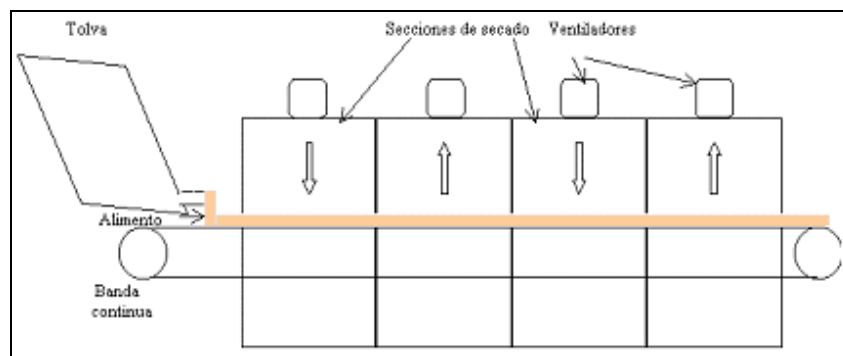


Figura 4.10. Secador de banda transportadora¹⁵

4.1.3.5 Secadores rotatorios

Son secaderos de funcionamiento continuo que constan de una carcasa cilíndrica que gira sobre unos soportes adecuados, por lo general esta carcasa está ligeramente inclinada respecto a la horizontal. La longitud del cilindro vana entre 4 y 10 veces el diámetro, cuyos valores oscilan entre 0,3 y 3 m.

¹⁵ <http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4070035/index.html>

El producto húmedo se introduce por un extremo del cilindro, avanza por él por gravedad, en virtud de la rotación del mismo y de la inclinación de la carcasa, y sale seco por el otro extremo. Cuando los gases calientes circulan en el sentido del avance del material, le ayudan a desplazarse a lo largo del secador.

El medio de calefacción es aire caliente o gases procedentes de la combustión que entran en contacto directo con el material, y pueden circular por el interior del cilindro en paralelo o a contracorriente.

Este tipo de secaderos suele estar equipado con aletas en la superficie interior del cilindro, con el fin de que se produzca el movimiento del sólido húmedo, su elevación a lo largo de la pared y su caída, transversal a la dirección de los gases calientes. Estas aletas pueden ser de forma variada, adaptándose a las características del producto. Cuando la circulación es en paralelo, se suprimen las aletas de la parte final para impedir un arrastre excesivo de polvo en los gases. Normalmente se instalan ciclones para recoger el polvo arrastrado por el aire.

Los secaderos rotativos trabajan a velocidades periféricas entre 0,2 y 0,5 $\text{m}\cdot\text{seg}^{-1}$, la inclinación de los cilindros varía entre 0 y 0,08 metros por metro. En algunos casos de funcionamiento con circulación en paralelo, se emplean inclinaciones negativas para aumentar el tiempo de retención.

La temperatura del aire a la entrada depende de la naturaleza del producto a tratar y de la circulación del aire en relación con el avance del producto. Con circulación en paralelo se emplean temperaturas más elevadas que con circulación a contracorriente (figura 4.10). En el secado de subproductos agrícolas, son normales temperaturas del orden de 300°C.

Los secaderos rotatorios son apropiados para secar sólidos granulares o cristalinos, que presenten una adecuada resistencia a la rotura y a la abrasión, que fluyan con relativa libertad. También son útiles para materiales finos, si el arrastre de polvo no es excesivo. Este tipo de secadero ha sido muy utilizado, aunque los secaderos de lecho fluidizado parecen llamados a sustituirlos en muchas de sus aplicaciones.

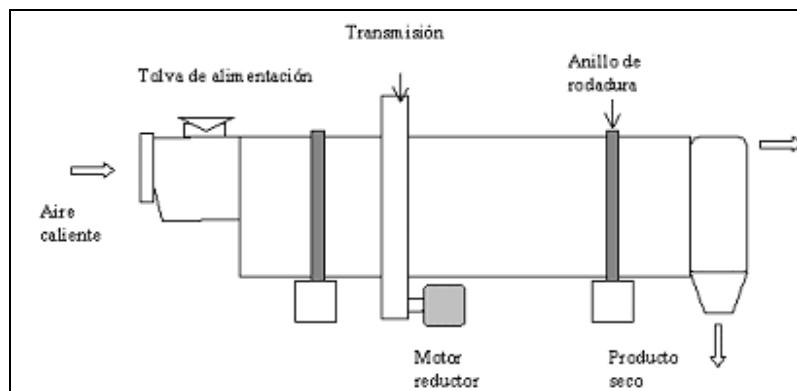


Figura 4.11. Secador rotatorio

4.1.3.6 Secaderos de lecho fluidizado

Este tipo de secaderos se utilizó originariamente para acabado del secado de gránulos de patata. En ellos, el aire caliente se utiliza simultáneamente como agente de secado y de fluidización al ser forzado a pasar a través del lecho de partículas del alimento, con una velocidad alta, suficiente para vencer las fuerzas gravitacionales del producto y mantener las partículas en estado suspendido. Las velocidades de aire que se requieren para conseguir esta fluidización varían con el producto y más específicamente con el tamaño de partícula y densidad. La mayor limitación de estos secaderos es el estrecho rango de tamaño de partícula (el diámetro usualmente oscila entre 10 μm y 20 mm) que puede efectivamente ser fluidizado.

La fluidización es una forma muy efectiva de maximizar la superficie de secado con un espacio total pequeño, se consigue una gran superficie efectiva de contacto entre el sólido que se seca y el aire. Este hecho, unido a que el sólido en lecho fluidizado está sometido a una acción de mezcla muy intensa, permite utilizar aire caliente a temperaturas muy elevadas. De este modo se consiguen grandes velocidades de transferencia de materia entre el sólido el aire, y por lo tanto tiempos de secado muy cortos. Estas altas velocidades de secado suponen tiempos de retención del producto en el equipo pequeños, lo que se traduce en instalaciones relativamente reducidas, que ocupan poco espacio en planta. Los coeficientes volumétricos de transferencia de calor

en un lecho completamente fluidizado son cuatro veces mayores que en un secadero rotatorio.

Los secaderos de lecho fluidizado pueden presentar muchas formas, pero básicamente constan de una simple cámara provista en su base de una rejilla para distribuir uniformemente los gases calientes a todo lo ancho y largo del lecho (figura 4.11). Frecuentemente la sección próxima a la rejilla es desmontable, para facilitar su limpieza. La parte superior suele terminar en punta para reducir el arrastre de polvo.

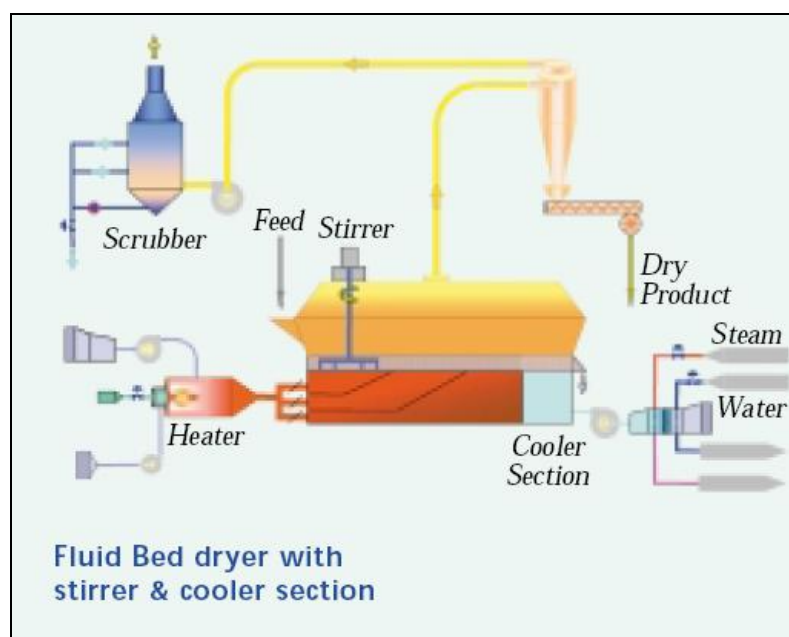
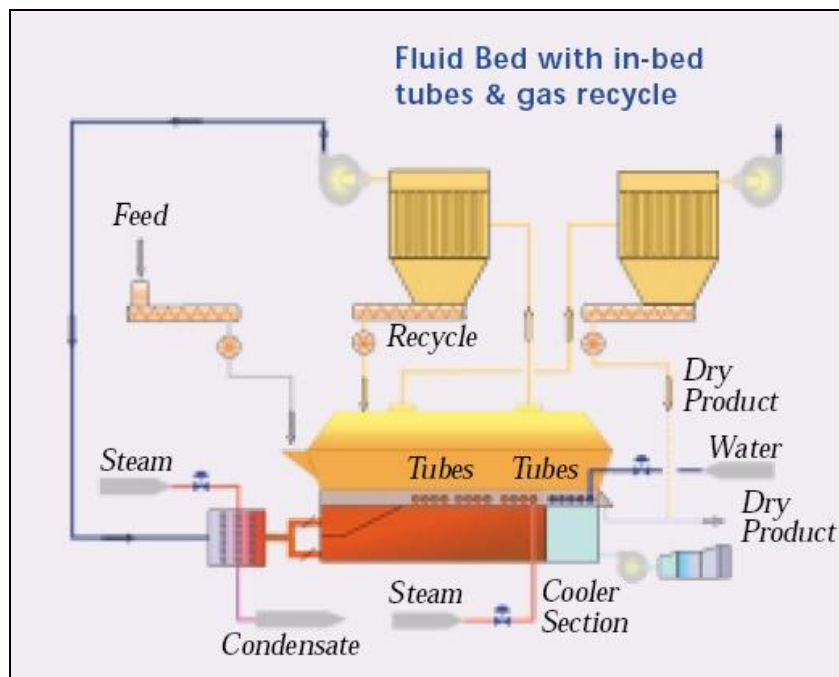


Figura 4.12. Secadores de Lecho Fluidizado¹⁶

4.1.3.7 Secadores por arrastre neumático

Son secadores continuos de calentamiento directo, en los que la eliminación de la humedad se realiza dispersando el producto a secar en una corriente de gases calientes que lo transportan a velocidades elevadas. El secado tiene lugar durante el transporte.

La gran superficie expuesta al aire, la diferencia entre la velocidad del aire y la del producto y la gran turbulencia originada, hacen que la velocidad de transmisión de calor desde el gas a las partículas sólidas suspendidas sea alta y los tiempos de secado muy breves, pudiendo emplearse aire a altas temperaturas.

En esencia, los elementos básicos que integran un secadero neumático, son:

- Generador de aire caliente.
- Alimentador de producto húmedo.
- Ventilador.
- Conducto de secado y transporte simultáneos.
- Ciclón o ciclones.

Para determinados productos se incorpora un molino triturador.

La alimentación húmeda entra por el mezclador, en donde se incorpora suficiente material seco para que pueda fluir libremente. El material mezclado se descarga en el interior de un molino de martillos, que es barrido por los gases de combustión calientes procedentes del generador. El sólido pulverizado es arrastrado fuera del molino por la corriente gaseosa a través de una conducción bastante larga, en la que tiene lugar el secado; la longitud de esta conducción debe ser la adecuada para conseguir el secado deseado. Los gases y el material seco se separan en el ciclón, y el gas limpio sale por el extractor. Los sólidos se retiran del ciclón a través del alimentador en estrella, que los lleva hasta el repartidor de sólidos, que recircula parte del material seco para mezclarlo con la alimentación.

¹⁶ USDA. 1977. Canning, Freezing and Storing Garden Produce. USDA Agricultural Information Bulletin 410

Se utilizan velocidades de aire entre 8 y 30 $\text{m}\cdot\text{seg}^{-1}$ con relaciones Kg. sólido por Kg. gas variables entre 0,3 y 1, según el producto.

Incluso con conductos de secado largos, el tiempo de permanencia de los sólidos en la conducción es muy corto, del orden de 5 seg., lo que permite utilizar temperaturas del aire a la entrada muy elevadas, que varían entre 150 y 700°C. Aún utilizando aire a temperatura tan elevada, con tiempos de permanencia tan cortos, se consigue que la temperatura del sólido no llegue a superar los 40°C, lo que permite utilizar este tipo de secadores para productos sensibles al calor.

La capacidad de evaporación disminuye a lo largo del trayecto del sólido y depende de la temperatura del aire a la entrada y de la relación sólido/aire.

Las ventajas que presente este método de secado son:

- Transporte simultáneo del producto.
- Posibilidad de clasificación por tamaño de partícula.
- Coste inicial bajo.
- Simplicidad mecánica.
- Economía de espacio en planta.
- Polivalencia.

Junto al sistema básico que se ha descrito, se han desarrollado dispositivos y montajes particulares que permiten la mejora del proceso de secado, adaptándolo las características del producto.

Existen instalaciones con la conducción de transporte neumático en anillo cerrado, con el fin de aumentar el tiempo de contacto aire-producto a costa de reducir la capacidad del equipo.

Otro sistema interesante es el secadero en "surtidor de aire". El material húmedo es dispersado en el aire caliente y secado en el interior del cono central.

Las partículas secas, más ligeras, son conducidas al ciclón, mientras que las partículas más pesadas y húmedas caen en la cámara exterior recorriendo una espiral con la ayuda de una corriente de aire tangencial, para volver a introducirse en el interior del cono hasta terminar su secado.

Los secaderos neumáticos son apropiados para todos los productos que puedan dispersarse adecuadamente en una corriente de gases y transportarse. Resultan adecuados para productos granulados o muy divididos (forrajes, almidones, harinas, gránulos de patata) que pierdan rápidamente su humedad y que no resulten afectados por la erosión que sufren durante el transporte. No son adecuados sin embargo para productos muy abrasivos, o que no admitan roturas, ni para los que tengan tendencia a adherirse a las paredes.

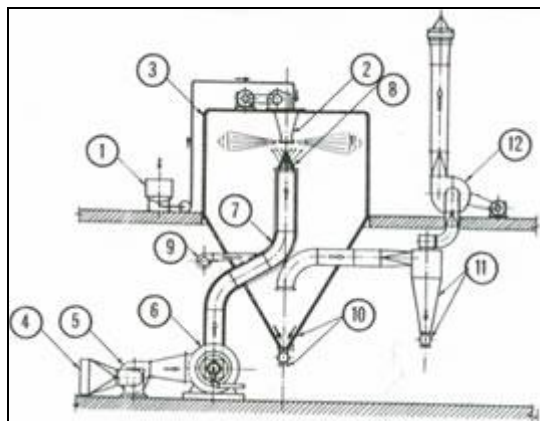


Figura 4.13. Secador neumático tipo spray

4.1.3.8 Secadores por atomización

El método de secado por atomización es el más importante para secar productos líquidos. Por definición es la transformación de una alimentación en estado fluido a una forma seca por atomización en un medio caliente. Se basa, pues, en la evaporación rápida del disolvente por pulverización del producto a secar en el seno de una corriente de gas caliente.

Las partes esenciales de un equipo de secado por atomización son:

- Sistema calefactor del aire.
- Sistema de atomización del producto líquido.

- Cámara de secado.
- Sistema de separación de polvo.
- Sistema de impulsión de aire.

4.1.4 SECADORES POR CONDUCCIÓN

Este tipo de secaderos se caracterizan porque en ellos la transmisión de calor hasta el producto húmedo tiene lugar por conducción a través de una pared, generalmente metálica, son por lo tanto secaderos indirectos.

La fuente de calor puede ser: vapor que condensa, agua caliente, aceites térmicos, gases de combustión y resistencias eléctricas.

Los secaderos indirectos permiten la recuperación del disolvente, y son apropiados para la desecación a presiones reducidas y en atmósferas inertes, por lo que se usan para deshidratar productos termolábiles o fácilmente oxidables.

4.1.4.1 Secadores de bandejas a vacío

Son secadero, indirectos por cargas, formados por una cámara herméticamente cerrada, provista de placas calefactoras y bandejas que soportan el material a secar. La cámara está conectada a una bomba de vacío a través de un condensador. El elemento calefactor suele ser un fluido tal como agua caliente (para bajas temperaturas), vapor de agua o frecuentemente aceites térmicos. En estos casos, las placas que son huecas y están constituidas por una doble lámina de acero, están conectadas en paralelo a colectores de entrada y salida del fluido térmico. En algunos casos se emplean placas calentadas eléctricamente.

En el secado a vacío se baja el punto de ebullición del agua por debajo de 100°C por reducción de la presión. El grado de vacío y la temperatura de secado dependen de la sensibilidad del material.

El producto a secar se dispone sobre bandejas metálicas que se colocan sobre la superficie calefactora. El calor se transmite por conducción hasta el producto, que a baja temperatura libera vapores de disolvente debido al elevado grado de vacío que se aplica a la cámara. Los gases húmedos son evacuados continuamente hasta un condensador que elimina la humedad o vapores de disolvente tras condensarlos. Los gases no condensados llegan a la fuente de vacío donde son extraídos.

El costo de operación por unidad de superficie en secaderos de bandejas a vacío es ocho veces superior al de un equipo equivalente que trabaje a presión atmosférica. La eficiencia térmica, como en los demás secaderos por conducción, es mayor que en los secaderos por convección.

El secado a vacío es uno de los métodos más caros de secado. Sus costes son comparables al secado por congelación pero más altos que con otros sistemas. Dado este elevado coste, los secaderos a vacío se utilizan a menudo como secaderos secundarios. El contenido de agua de los alimentos se reduce hasta un 20-25% por un método convencional, por ejemplo con aire caliente, y después se aplica el vacío para llevar la humedad hasta un 1-3%. El producto se seca a vacío a bajas temperaturas, entre 35 y 60°C.

Los secaderos de bandejas a vacío se utilizan industrialmente para deshidratar productos altamente valiosos, sensibles a la temperatura o fácilmente oxidables o incluso para recuperar disolventes valiosos.

4.1.4.2 Secadores de tornillo sinfín

Son secadores continuos de calentamiento indirecto, formados esencialmente por un transportador de tornillo sinfín horizontal encerrado dentro de una carcasa cilíndrica encamisada.

El producto, que se alimenta por un extremo, se transporta lentamente a través de la zona caliente y, se descarga por el otro extremo. El vapor generado se extrae a través de

conducciones colocadas en la parte superior de la carcasa. Estos equipos permiten la construcción modular, y en este caso, el último módulo suele actuar como enfriador.

Estos secaderos son útiles para operar con sólidos demasiado finos o demasiado pegajosos para ser tratados en secaderos rotatorios. Están completamente cerrados y permiten recuperar los vapores de] disolvente. Si disponen de alimentadores con cierre adecuado, pueden trabajar bajo un vacío moderado.

4.1.4.3 Secaderos de rodillos

En los secaderos de rodillos el producto se seca sobre la superficie de un rodillo giratorio calentado interiormente. Para que pueda utilizarse este método el alimento debe ser líquido o semilíquido. El producto se extiende en forma de capa fina sobre la superficie del cilindro horizontal que gira lentamente, y la eliminación del agua tiene lugar en el curso de aproximadamente 300°C de una revolución.

El cilindro se calienta interiormente con vapor de agua a presión, o bien con menos frecuencia, con agua caliente u otro líquido transmisor de calor. El producto seco se separa en forma de película continua por medio de una cuchilla que rasca longitudinalmente la superficie del cilindro.

Fundamentalmente existen tres tipos de aparatos, de acuerdo con la disposición de los cilindros: cilindro sencillo, cilindros dobles y cilindros gemelos.

El secador de cilindro sencillo está formado, lógicamente, por un solo rodillo. El de cilindro doble está constituido por dos rodillos, que giran acercándose en su parte superior. En este equipo se ajusta cuidadosamente la separación entre los rodillos para controlar el espesor del alimento depositado. Los cilindros gemelos ocupan una disposición general similar a la de los cilindros dobles, sin embargo su sentido de giro es contrario al de éstos.

En general, estos equipos van provistos de campanas extractoras para recoger y evacuar el vapor de agua. El equipo entero puede trabajar a vacío si se le dota de una envoltura adecuada, y puede trabajar así en el secado de productos termolábiles.

4.1.5 OTROS MÉTODOS DE SECADO

4.1.5.1 Secadores Foam Mat

Este tipo de secaderos puede utilizarse únicamente en alimentos líquidos que sean capaces de formar espuma estabilizada. Este requerimiento impone una restricción sobre la amplia aplicabilidad del método en la industria de alimentos, puesto que sólo unos pocos productos, tal como la leche entera, tienen capacidad para formar espumas estables. Los zumos de frutas se han secado por este sistema, pero añadiéndoles estabilizadores de espuma. Se han utilizado con éxito en la industria alimentaria, gomas vegetales y proteínas solubles como agentes estabilizadores de espuma; en el secado de frutas y hortalizas se utilizan como componentes formadores del film gliceril monostearato, proteína solubilizada de soja y propilenglicol monostearato.

En primer lugar se hace espuma en el alimento líquido y después se pulveriza formando una lámina sobre un soporte perforado o sólido donde se seca por medio de una corriente de aire caliente. La formación de espuma se consigue por agitación del producto fluido por medio de aire. El espesor de la capa de espuma se mantiene alrededor de 0.1-0.5 mm. El tiempo de secado y la temperatura depende del producto a secar, la velocidad y la humedad del aire no tienen efecto apreciable sobre el tiempo requerido.

4.1.5.2 Secado por explosión (Explosion puffing)

La técnica de secado por explosión fue desarrollada inicialmente para satisfacer el objetivo de deshidratar piezas relativamente grandes de frutas y hortalizas que se deseaba reconstituir rápidamente, el sistema puede operar a costes comparables a los convencionales por aire caliente.

El método consiste en una deshidratación parcial inicial, necesaria para reducir el contenido de humedad a un nivel que se produzca la desintegración del producto durante la fase de explosión. Dado que la uniformidad es esencial para obtener buenos resultados, se equilibra la humedad después de este secado parcial. Posteriormente, el producto se introduce en una cámara donde se expone a vapor a presión entre 0.7 y 4.9 bar., con lo cual se aumenta la temperatura rápidamente y el agua que contiene el producto, que se mantiene líquida, está en situación de sobrecalentamiento con respecto a la presión atmosférica. Cuando el producto se descarga de forma repentina a la atmósfera, la rápida caída de presión provoca la evaporación del agua del interior del mismo. El vapor que sale del alimento produce canales y fisuras, con lo cual le proporciona una estructura porosa.

4.1.5.3 Secado por microondas

En el secado por microondas el producto se expone a ondas electromagnéticas de alta frecuencia. La transferencia de estas ondas al producto es similar a la transferencia de calor radiante. Como resultado de estas ondas de alta frecuencia, las moléculas de agua se polarizan y tienden a cambiar de orientación. En el proceso de orientación, se genera suficiente calor para expeler la humedad del producto.

Los generadores de microondas que se diseñan para secado trabajan a frecuencias de 900-2.500 Mhz. Cuando la frecuencia aumenta, el calor generado por el sistema disminuye.

El uso de este tipo de energía ha encontrado su aplicación en el acabado del secado de patatas chips. Puede reducir el tiempo de secado, particularmente cuando el tamaño de la pieza es tal que no es posible el secado convencional. Sin embargo el alto coste por unidad de energía comparado con la energía convencional y el alto coste inicial del equipo limitan su uso para el secado.

4.1.5.4 Deshidratación osmótica

Entre los alimentos presentes en el mercado hay un grupo de productos que se parecen a los alimentos deshidratados por su estabilidad microbiana, pero que no se pueden clasificar como alimentos deshidratados. Su contenido de humedad es alto por lo que el alimento es plástico y correoso. Ciruelas, higos y uvas, frutas confitadas y embutidos curados son buenos ejemplos de este tipo de alimentos.

Estos alimentos contienen de 20 a 50% de agua y se les llama *alimentos de humedad intermedia*. Son estables microbiológicamente, pero son susceptibles de cambios químicos, sufren el pardeamiento no enzimático, reacción de Maillard, en mayor proporción que el producto seco. Los parámetros del proceso aplicados no desnaturalizan las proteínas, por lo tanto puede desarrollarse alguna actividad enzimática.

La estabilidad microbiológica de los alimentos de humedad intermedia se debe a la suficientemente baja actividad de agua del alimento. Esta reducida actividad de agua puede conseguirse de dos formas, por adición de humectantes o por eliminación del solvente (por ejemplo, agua). El primer método es menos aceptado por los consumidores puesto que requiere la adición al alimento de grandes cantidades de cloruro sódico, azúcares o polioles. El segundo método es costoso energéticamente.

El uso de la ósmosis permite utilizar simultáneamente los dos métodos de reducción de la actividad de agua en los alimentos. La permeabilidad de los tejidos de las plantas a los azúcares y compuestos de alto peso molecular es baja, por lo que el producto se impregna con sustancias osmoactivas únicamente en las capas superficiales. El agua es eliminada por ósmosis y el jugo celular se concentra sin fase de transición del solvente. Esto hace favorable el proceso desde el punto de vista energético. El flujo de agua es mucho mayor que el flujo a contracorriente de la sustancia osmoactiva. Por esta razón a este proceso se le llama *deshidratación osmótica*¹⁷.

Los alimentos obtenidos por este método presentan varias ventajas:

- Están listos para comer, no requieren rehidratación.

¹⁷ Potter., N.N.,1978 "La Ciencia de los Alimentos". 2 Edición. Edutex. S.A. México 13 D.F.

- La cantidad de sustancia osmoactiva que penetra en el tejido puede ajustarse a requerimientos individuales.
- La composición química del alimento se puede regular de acuerdo a las necesidades.
- La masa de materia prima se reduce, usualmente a la mitad.

La deshidratación osmótica no reduce suficientemente la actividad de agua para impedir la proliferación de los microorganismos. El proceso aumenta, en cierta forma, la vida útil del alimento, pero no lo preserva. Por esta razón, es necesaria la aplicación de otros métodos de conservación, tales como congelación, pasterización o deshidratación. Sin embargo, el procesado de los semiproductos deshidratados osmóticamente es menos caro y preserva mejor las características adquiridas durante la ósmosis.

Las sustancias osmóticas utilizadas deben cumplir una serie de requerimientos especiales, deben ser comestibles con sabor y flavor aceptables, no tóxicas, inertes frente a los componentes del alimento, y si es posible altamente activas osmóticamente. En la deshidratación osmótica de frutas y hortalizas se han utilizado sacarosa, lactosa, glucosa, fructosa, maltodextrinas y almidón o jarabe de maíz, también se ha estudiado el empleo de miel, glicerol, hidrocoloides de plantas y cloruro sódico. Las soluciones de azúcar se utilizan principalmente para la deshidratación de frutas, siendo la sacarosa el azúcar usado con más frecuencia, aunque puede ser sustituido por la lactosa, la glucosa y fructosa que presentan un efecto similar de deshidratación. Glicerol, jarabe de almidón y cloruro sódico son las utilizadas en el tratamiento de hortalizas. Se ha comprobado que la adición de sustancias de bajo peso molecular tales como cloruro sódico, ácido málico, ácido láctico y ácido clorhídrico en concentración de 1 a 5% a soluciones de azúcar o de jarabe de almidón mejora el proceso de deshidratación osmótica. En general favorecen la salida de agua del alimento. Se adiciona cloruro cálcico y ácido málico a soluciones de sacarosa para mejorar la textura de manzanas tratadas por ósmosis.

La deshidratación osmótica es un proceso complejo de transferencia de masa en contracorriente entre los tejidos de las plantas y la solución hipertónica. Esto lleva a la deshidratación del producto y también a cambios en su composición química, por lo

tanto, las propiedades del alimento así deshidratado diferirán substancialmente del producto secado por convección.

4.1.5.5 Liofilización

Llamada anteriormente crio-desección, la liofilización¹⁸, cuyo nombre procede de la industria farmacéutica, es un proceso de secado cuyo principio consiste en sublimar el hielo de un producto congelado. El agua del producto pasa, por tanto, directamente del estado sólido al estado de vapor, sin pasar por el estado líquido.

La liofilización presenta una serie de ventajas frente a otras técnicas de secado, en particular la estructura original del alimento se mantiene mejor y la retención de aromas y nutrientes es excelente. La textura es aceptable, especialmente con vegetales. Los productos liofilizados presentan una mayor calidad que los mismos productos deshidratados por otros métodos. Los alimentos liofilizados pueden ser almacenados a temperatura ambiente durante largos periodos y su rehidratación es fácil. Sin embargo, los costes de la liofilización son usualmente prohibitivos Para aplicaciones ordinarias: son aproximadamente el doble que en el secado en cinta a vacío y casi cinco veces los de la atomización. La liofilización es un proceso caro, tanto en términos de inversión como en costes de operación y también en tiempo de proceso. No obstante dichos costes pueden ser asumidos por la ventaja que supone la alta calidad de los productos obtenidos.

La liofilización se aplica por tanto únicamente a productos de precio alto. Su uso está prácticamente restringido a te y café instantáneos, usos militares, montañismo, etc. Es típico el café liofilizado, para el que se utilizan sólo variedades aromáticas, que no soportan tratamientos enérgicos como los que se dan en la atomización. El café atomizado procede de variedades sin aroma. También se liofilizan productos como los champiñones destinados a las sopas deshidratadas, o bien frutas como las fresas,

¹⁸ Potter., N.N.,1978 "La Ciencia de los Alimentos". 2 Edición. Edutex. S.A. México 13 D.F.

blandas y frágiles, y con colores y sabores delicados. Las fresas deshidratadas por cualquier otro procedimiento, cuando se reconstituyen tienen la apariencia de una mermelada.

La liofilización presenta una serie de ventajas, entre las cuales se citan las siguientes:

- La temperatura de trabajo es muy baja y por lo tanto los productos termolábiles no se alteran.
- No existe peligro de oxidación.
- No hay agua libre, por tanto no hay peligro de hidrólisis ni de crecimiento microbiano.
- Al evaporarse el hielo, quedan poros que permiten una rehidratación o reconstitución rápida.
- La humedad residual es baja.
- La duración de la conservación es larga.
- La retención de aromas es muy alta.
- Son productos de peso ligero que no necesitan cadenas de refrigeración para su distribución.

Pero también presenta algunos inconvenientes:

- Gran inversión en equipamiento (alrededor de tres veces el de los otros métodos).
- Altos costes de energía (también alrededor de tres veces el de los otros métodos).
- Proceso lento y largo (entre 4 y 10 horas por ciclo de secado).
- Posibles daños a productos, debido al cambio de pH que se produce cuando se concentran los solutos, como consecuencia de que el agua pura se convierte en hielo.

La liofilización es útil cuando se cumplen en el producto uno o más de los siguientes requisitos:

- Es inestable.
- Es sensible al calor.
- Cuando se requiere una rápida y completa rehidratación. Presenta un valor alto.
- Debe minimizarse su peso.
- No es aconsejable su almacenamiento en refrigeración o en congelación.

En las últimas dos décadas se ha desarrollado una técnica de conservación que permite aumentar la estabilidad de los alimentos, manteniendo sus características de calidad muy parecidas al alimento originario. Está basada en la teoría de los "Obstáculos". Se les denomina así a los factores que de alguna manera dificultan el desarrollo natural de los MO, tales como el calor, el frío, la Aw, el pH, el Eh y otros mencionados antes. La pregunta es, cuántos de estos obstáculos son necesarios para lograr la estabilidad de IMF y a qué niveles de estos obstáculos depende no solo el tipo, sino también el número de MO presentes. Puesto que la mayoría de procesos empleados en la conservación de alimentos están basados en varios obstáculos, la mayoría de alimentos procesados también tienen varios obstáculos inherentes los cuales dan la estabilidad microbiológica deseada en los productos. La Fig. 3. presenta seis ejemplos del efecto de los obstáculos en alimentos.

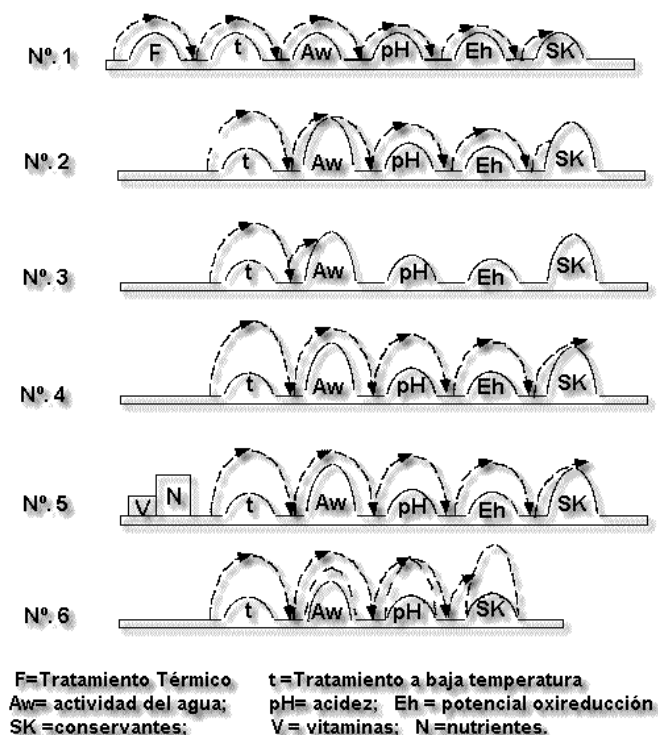


Figura 4.14. Estabilidad de alimentos basados en el efecto "obstáculo".

El ejemplo 1 presenta el caso de un alimento que posee 6 obstáculos, los cuales los MO presentes no los pueden superar todos. Por lo tanto este alimento tiene suficiente estabilidad microbiológica. Aquí todos los obstáculos tienen la misma intensidad, que en la realidad es difícil encontrar.

Una situación más real se presenta en el ejemplo 2. La estabilidad microbiológica de este producto está basada en 5 obstáculos de diferente intensidad. Los principales obstáculos son la A_w y el agente conservante (ej. sorbato de potasio), y los obstáculos adicionales son la temperatura de almacenamiento, el pH y el potencial redox. Estos obstáculos son suficientes para detener los tipos y el número de microorganismos asociados con este producto.

El ejemplo 3 representa el mismo producto pero con una mejor condición sanitaria, es decir con pocos MO al iniciar. Por lo tanto, en este producto, solo 2 obstáculos serían necesarios.

De otra parte, en el ejemplo 4, debido a las deficientes condiciones de higiene, demasiados MO están presentes desde el comienzo. De ahí que los obstáculos inherentes en este producto no previenen el deterioro.

El ejemplo 5 es un alimento de excelente contenido de nutrientes y vitaminas. Por lo tanto, aunque por el tipo y número usual de MO y los mismos obstáculos del ejemplo 2, el 3 y 4 no son suficientes. Hay alguna indicación en el sentido que importa más el resultado del obstáculo que el número que se interpongan para determinar la estabilidad microbiológica del alimento.

El ejemplo 6 ilustra el efecto sinérgico que los obstáculos en un alimento podrían tener entre sí. El efecto del obstáculo es de fundamental importancia en la conservación de alimentos, ya que el concepto de obstáculo gobierna el deterioro microbiológico de los alimentos tanto como su daño o fermentación.

Procesos Parametros	Procesos												
	Calentamiento	Enfriamiento	Congelado	Secado	Curado	Salado	Azucarado	Acidificación	Fermentación	Ahumado	Desoxigenado	IMF	Radiaciones
F	X	⊗	⊗	⊗	⊗	○	⊗	○	○	⊗	⊗	⊗	○
t	⊗	X	X	○	⊗	⊗	○	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	○
Aw	⊗	⊗	X	X	X	X	X	⊗	⊗	⊗	○	X	○
pH	⊗	⊗	○	⊗	⊗	⊗	X	X	X	⊗	⊗	⊗	○
Eh	⊗	⊗	○	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	X	⊗	○
SK	⊗	⊗	○	⊗	X	⊗	⊗	⊗	⊗	X	⊗	○	○
Flora	○	○	○	○	⊗	○	○	⊗	X	○	⊗	⊗	○
Radiac.	⊗	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	X

F=Alta temperatura; t= baja temp.; X= obstáculo principal; ⊗=obstáculo adicional
○ = poco importante en este proceso; IMF alimento de humedad intermedia

Figura 4.15. Procesos tradicionales y nuevos desarrollados en conservación de alimentos y parámetros u obstáculos sobre los que están basados¹⁹.

¹⁹ Potter., N.N.,1978 "La Ciencia de los Alimentos". 2 Edición. Edutex. S.A. México

CAPÍTULO 5

PARÁMETROS RELACIONADOS CON LA DESHIDRATACIÓN

5.1 CONTENIDO DE HUMEDAD

El contenido de humedad es la cantidad de agua evaporable que contiene un producto, es decir el agua que no es constituyente del producto. Se expresa generalmente en términos de porcentaje, ya sea en relación a su masa total (contenido de humedad en base húmeda) o a su masa seca (contenido de humedad en base seca).

La masa seca de un producto, es la masa resultante que se obtiene al eliminar la masa de agua evaporable existente en el producto.

El contenido de humedad en base húmeda indica el porcentaje que representa la masa de agua evaporable de un producto con relación a su masa total (masa seca del producto más masa de humedad o agua), y se calcula de la siguiente manera:

$$X_w = \left(\frac{m_w}{m_T} \right) \cdot 100 \quad (5.1)$$

$$m_T = m_s + m_w \quad (5.2)$$

donde:

X_w : Contenido de humedad en base húmeda [%]

m_T : Masa total del producto [Kg]

m_s : Masa seca del producto [Kg]

m_w : Masa de agua evaporable del producto [Kg]

El contenido de humedad en base seca indica el porcentaje que representa la masa de agua evaporable de un producto con relación a su masa seca, y se calcula de la siguiente manera:

$$X_d = \left(\frac{m_w}{m_s} \right) \cdot 100 \quad (5.3)$$

donde:

X_d : Contenido de humedad en base seca [%]

m_s : Masa seca del producto [Kg]

m_w : Masa de agua evaporable del producto [Kg]

El contenido de humedad de un producto generalmente está dado en función de su masa total, es decir en base húmeda, pero sin embargo, para fines de cálculo resulta más conveniente referirse a su humedad en base seca, debido a que la cantidad de materia seca del producto permanece constante a lo largo de todo el proceso de secado.

Para poder relacionar el contenido de humedad en base húmeda con el contenido de humedad en base seca tenemos lo siguiente:

$$X_w = \left(\frac{X_d}{100 + X_d} \right) \cdot 100 \quad (5.4)$$

$$X_d = \left(\frac{X_w}{100 - X_w} \right) \cdot 100 \quad (5.5)$$

5.1.1 CONTENIDO DE HUMEDAD INICIAL

El contenido de humedad inicial es la cantidad de agua evaporable que contiene un producto antes de ser sometido a un proceso de secado, y puede variar significativamente dentro de un mismo producto, debido a que el contenido de humedad del alimento se da en función de la acción del medio ambiente y de la época de corte, es decir si se lo corta estando tierno o maduro.

De acuerdo a su humedad inicial, los productos agrícolas se clasifican de la siguiente forma:

Tabla 5.1. Clasificación de productos agrícolas de acuerdo a su humedad inicial²⁰

CLASIFICACIÓN	RANGO [%]
Humedad inicial baja	15 – 34
Humedad inicial media	35 – 59
Humedad inicial alta	60 – 79
Humedad inicial muy alta	80 – 90

5.1.2 CONTENIDO DE HUMEDAD DE EQUILIBRIO

Si un producto orgánico se expone a una corriente de aire, el producto absorberá o entregará agua desde o hacia la atmósfera que lo rodea, cuando no existe una igualdad entre las presiones parciales de vapor del aire circundante y de la humedad del producto.

Cuando el producto está en contacto con el aire durante un período de tiempo suficiente, las presiones de vapor se igualan y se establece un estado de equilibrio entre el aire y el producto húmedo. A este estado se le denomina **equilibrio higroscópico**.

Al alcanzarse este equilibrio, no existe pérdida o ganancia de humedad por parte del producto o del aire y se dice que el producto a llegado a su **contenido de humedad de equilibrio o humedad límite**.

²⁰ Ministerio de Agricultura, Ganadería Acuacultura y Pesca del Ecuador

El **contenido de humedad de equilibrio** (X_{eq}), es la cantidad de agua evaporable que contiene un producto cuando alcanza condiciones de equilibrio con el aire que lo rodea, por lo tanto, la **humedad de equilibrio** es el límite al que puede llevarse el contenido de humedad de un producto por contacto con aire de humedad y temperatura dadas, y permanecerá invariable mientras las características del aire circundante no varíen.

5.1.3 CONTENIDO DE HUMEDAD LIBRE

Es la diferencia que existe entre el contenido de humedad del producto y la humedad de equilibrio.

$$X_F = X_d - X_{eq} \quad (5.6)$$

donde:

X_F : Contenido de humedad libre [Kg agua / Kg masa seca]

X_d : Contenido de humedad en base seca [Kg agua / Kg masa seca]

X_{eq} : Contenido de humedad de equilibrio [Kg agua / Kg masa seca]

Por lo tanto la **humedad libre** es la cantidad de agua que puede perder un producto en contacto con aire de condiciones dadas y constantes hasta alcanzar el **equilibrio higroscópico**.

5.1.4 CONTENIDO DE HUMEDAD RETENIDA O LIGADA

Es el contenido de humedad que presenta un producto cuando alcanza condiciones de equilibrio con **aire saturado** (humedad relativa del 100%).

5.1.5 CONTENIDO DE HUMEDAD NO RETENIDA O DESLIGADA

Es la diferencia entre el contenido de humedad del producto y la humedad ligada, es decir, es la humedad que puede perder un producto en contacto con aire saturado hasta alcanzar el equilibrio higroscópico.

5.2 ACTIVIDAD DE AGUA

La **actividad de agua** de un producto es el valor que presenta la humedad relativa del aire cuando alcanza condiciones de equilibrio con dicho producto. Este valor es adimensional y siempre es inferior a 1 para el caso de alimentos, y está dado por:

$$a_w = \left(\frac{\phi_{eq}}{100} \right) \quad (5.7)$$

donde:

a_w : Actividad de agua [adimensional]

ϕ_{eq} : Humedad relativa del aire en equilibrio higroscópico [%]

También se la puede definir como la relación entre la presión parcial del vapor de agua de un alimento (P_{va}) y la presión parcial del vapor de agua pura (P_v) a la misma temperatura.

$$a_w = \left(\frac{P_{va}}{P_v} \right) \quad (5.8)$$

donde:

a_w : Actividad de agua [adimensional]

P_{va} : Presión parcial del vapor de agua de un alimento [Pa]

P_v : Presión parcial del vapor de agua pura [Pa]

Al reducir la **actividad de agua** a niveles inferiores a **0,7** nos permite prevenir el daño en los alimentos causado por microorganismos, especialmente bacterias, levaduras y mohos, e interrumpe la mayoría de las reacciones químicas y enzimáticas de

alteración que den origen a sabores y olores desagradables, así como cambios de su color a colores pardos.

La **actividad de agua** está determinada por el tipo de producto, su temperatura y contenido de humedad, y nos permite tener una medida de la mayor o menor disponibilidad del agua en los alimentos. A mayor disponibilidad, mayor proliferación de microorganismo y mayor deterioro del alimento.

5.3 CURVAS DE EQUILIBRIO HIGROSCÓPICO

La relación que existe entre el contenido de humedad de equilibrio de un producto y la actividad de agua a sido estudiada por diversos investigadores. Es así que Oxley en 1948 observó que la relación: Contenido de humedad de equilibrio - Actividad de agua, a una temperatura constante, puede ser representada por una curva sigmoide, cuya pendiente aumenta sensiblemente cuando la humedad relativa del aire es aproximadamente del 80%. Estas curvas se conocen con el nombre de **Curvas de equilibrio higroscópico ó Isotermas de sorción**.

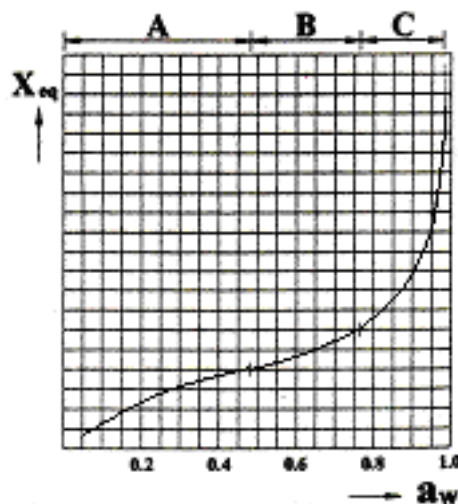


Figura 5.1. Curva de equilibrio higroscópico

Estas curvas se dividen en tres zonas o segmentos, en cada uno de los cuales predomina un tipo diferente de humedad:

- En la **zona A**, predomina la energía química de unión entre las moléculas de agua y la sustancia seca. El agua ya no está más en la fase líquida. El calor de

vaporización del agua del alimento es más alto que el calor de vaporización del agua pura, debido a que para remover las moléculas de agua desde la superficie sólida deben ser suministrados tanto el calor de vaporización como el calor de adsorción.

- En la **zona B**, la influencia de los sólidos insolubles sobre la a_w se vuelve significativa. La isoterma de sorción se suaviza y presenta pequeños cambios de contenido de humedad en relación a grandes cambios en la actividad de agua. En esta zona, el agua se mantiene en la matriz sólida del alimento por medio de condensación capilar y adsorción en capas múltiples.
- En la **zona C**, la influencia de los sólidos insolubles en la actividad de agua es despreciable, siendo la a_w dependiente del soluto y del contenido de humedad de la fase de solución.

Al tomar diferentes valores de temperatura, se obtiene una serie de curvas de **equilibrio higroscópico** para un mismo producto.

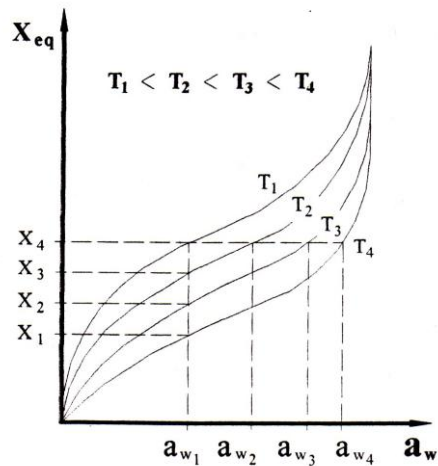


Figura 5.2. Serie de curvas de equilibrio higroscópico

En la **Figura 5.2** podemos observar que a medida que aumenta la temperatura, el contenido de humedad de equilibrio se establece para humedades relativas de aire más altas.

Si se mantiene constante la humedad relativa del aire, el aumento de su temperatura permite alcanzar humedades de equilibrio más bajas en el

producto. Este incremento de temperatura aumenta la capacidad de absorción del aire, permitiendo alcanzar en el producto contenidos de humedad más bajos.

5.3.1 IMPORTANCIA DE LAS CURVAS DE EQUILIBRIO HIGROSCÓPICO

Las curvas de equilibrio higroscópico nos ayudan con información sobre los contenidos de humedad que deben alcanzarse en los productos, a fin de lograr una actividad de agua adecuada para la conservación de estos. Además nos permiten conocer cual es el contenido de humedad mínimo que puede alcanzarse en un proceso de secado, cuando el producto es expuesto a una corriente de aire de determinada humedad y temperatura, con lo que podemos cuantificar la máxima humedad que se puede extraer del producto a determinadas condiciones del aire de secado.

5.3.2. OBTENCIÓN DE LAS CURVAS DE EQUILIBRIO HIGROSCÓPICO

Las curvas de equilibrio higroscópico son propias de cada alimento, y aún cuando el alimento sea el mismo, estas pueden ser diferentes por cuanto dependen de su estado (forma, tamaño, contenido de humedad).

Estas curvas se determinan experimentalmente, y se obtienen colocando un alimento en un recipiente cerrado y midiendo la humedad relativa del aire y el correspondiente contenido de humedad del producto, después de que se ha establecido el equilibrio a una temperatura determinada.

También se pueden obtener colocando muestras de un mismo alimento en una serie de recipientes cerrados, en los cuales por ejemplo, mediante soluciones salinas o ácido sulfúrico de diversas concentraciones, se mantienen una gama de humedades relativas constantes a una misma temperatura y determinando cuando se establece el equilibrio.

Otra forma de obtenerlas es cuando el volumen de aire en el recipiente es pequeño y hermético, manteniendo sucesivamente distintas temperaturas, registrando las humedades relativas de equilibrio correspondientes, para finalmente medir el contenido de humedad del producto.

Así se obtienen puntos de distintas curvas de equilibrio correspondientes a diferentes isotermas. Otros puntos de las isotermas pueden ser obtenidos con nuevas muestras del mismo producto con distintos contenidos de humedad.

5.4 CONVECCIÓN

La transferencia de calor es un proceso por el que se intercambia energía en forma de calor entre distintos cuerpos, o entre diferentes partes de un mismo cuerpo que están en distinto nivel energético. El calor se transfiere mediante convección, radiación o conducción. Aunque estos tres procesos pueden tener lugar simultáneamente, puede ocurrir que uno de los mecanismos predomine sobre los otros dos.

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 otra por un proceso llamado convección. La convección es el modo de transferencia de energía entre una superficie sólida

y un líquido o gas adyacente que está en movimiento, e implica los efectos combinados de la conducción y del movimiento de un fluido. Cuanto mayor es el movimiento de un fluido, tanto mayor es la transferencia de calor por convección. Ante la ausencia de cualquier movimiento del fluido, la transferencia de calor entre una superficie sólida y el fluido adyacente se da mediante conducción pura. La presencia de movimiento en el fluido incrementa la transferencia térmica entre la superficie sólida y el fluido, pero también complica la determinación de las tasas de transferencia de calor. El movimiento del fluido puede ser natural o forzado.

Supongamos, por ejemplo, que calentamos desde abajo una cacerola llena de agua. El líquido más próximo al fondo se calienta por el calor que se ha transmitido por conducción a través de la cacerola. Al expandirse, su densidad disminuye y como resultado de ello el agua caliente asciende y parte del fluido más frío baja hacia el fondo, con lo que se inicia un movimiento de circulación. El líquido más frío vuelve a calentarse por conducción, mientras que el líquido más caliente situado arriba pierde parte de su calor por radiación y lo cede al aire situado por encima. De forma

similar, en una cámara vertical llena de gas, como la cámara de aire situada entre los dos paneles de una ventana con doble vidrio, el aire situado junto al panel exterior (que está más frío) desciende, mientras que al aire cercano al panel interior (más caliente) asciende, lo que produce un movimiento de circulación.

El calentamiento de una habitación mediante un radiador no depende tanto de la radiación como de las corrientes naturales de convección. Debido a la convección, los radiadores deben colocarse cerca del suelo (y los aparatos de aire acondicionado cerca del techo) para que la eficiencia sea máxima. De la misma forma, la convección natural es responsable del tiraje de las chimeneas. La convección también determina el movimiento de las grandes masas de aire sobre la superficie terrestre, la acción de los vientos, la formación de nubes, las corrientes oceánicas y la transferencia de calor desde el interior del Sol hasta su superficie.

La tasa de transferencia de calor por convección llamada también flujo de calor por convección \dot{q}_{conv} se

determina por la ley de enfriamiento de Newton²¹, la cual se expresa como:

$$\dot{Q}_{conv} = h \cdot A \cdot (T_s - T_f) \quad (5.9)$$

donde:

\dot{Q}_{conv} : Tasa de transferencia de calor por convección
[J/s]

h : Coeficiente de transferencia de calor por convección
[W/(m²·°K)]

A : Superficie de contacto [m²]

T_s : Temperatura de la superficie [°K]

T_f : Temperatura del fluido mas allá de la superficie [°K]

El coeficiente de transferencia de calor por convección h no es una propiedad del fluido, es un parámetro determinado experimentalmente, cuyo valor depende de todas las variables que influyen en la convección, como la geometría de la superficie, la naturaleza del movimiento del fluido, las propiedades del fluido y la velocidad del fluido, y se lo obtiene mediante la siguiente ecuación²²:

$$h = \frac{Nu \cdot k}{L} \quad (5.10)$$

donde:

²¹ YUNUS A. CENGEL Y MICHAEL A. BOLES, Termodinámica, Tomo I, Cap.3

²² YUNUS A. CENGEL Y MICHAEL A. BOLES, Termodinámica, Tomo I, Cap.3

**h: Coeficiente de transferencia de calor por convección
[W/(m²°K)]**

Nu: Número de Nusselt [adimensional]

k: Conductividad térmica [W/(m°K)]

L: Longitud de la pared [m]

El Número de Nusselt es para la capa límite térmica lo que el coeficiente de fricción es a la capa límite de velocidad. Este parámetro es igual al gradiente de temperatura adimensional en la superficie y proporciona una medida de la transferencia de calor por convección que ocurre en la superficie.

Para determinar el Número de Nusselt, debemos considerar varios aspectos que nos dirán si la convección es natural (libre) o forzada, para lo cual se calculan otras variables adimensionales que nos llevarán a determinar este.

Primero se debe determinar si el flujo es laminar o turbulento, para lo cual se determina el Número de Reynolds²³, cuya interpretación es la razón de las fuerzas de inercia y viscosas, mediante la siguiente ecuación:

²³ FRANK P. INCROPERA, Fundamentos de transferencia de calor. Cap.6

$$\text{Re} = \frac{wL}{\nu} \quad (5.11)$$

donde:

Re: Número de Reynolds [adimensional]

w : Velocidad de flujo [m/s]

L: Longitud de la pared [m]

ν: Viscosidad cinemática [m²/s]

Entonces si:

- Re < 5x10⁵ El flujo es laminar

- Re > 5x10⁵ El flujo es turbulento

Para poder determinar si la convección es libre (natural) o forzada, existe un parámetro llamado Número de Grashoff²⁴, el cual juega el mismo papel en la convección libre que el Número de Reynolds en la convección forzada. Este se lo puede determinar mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Gr} = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L}{\nu^2} \quad (5.12)$$

donde:

²⁴ FRANK P. INCROPERA, Fundamentos de transferencia de calor. Cap.9

Gr: Número de Grashoff

g: Gravedad 9,81 [m/s²]

β : Coeficiente volumétrico de expansión térmica [K⁻¹]

T_s: Temperatura de la superficie [K]

T_∞: Temperatura del ambiente [K]

L: Longitud de la pared [m]

ν : Viscosidad cinemática [m²/s]

Entonces, una vez obtenido el Número de Grashoff y el Número de Reynolds, podremos determinar si la convección es natural (libre), forzada o combinada, mediante las siguientes relaciones²⁵:

$$\frac{Gr}{Re^2} > 1 \quad \text{Convección natural o libre}$$

$$\frac{Gr}{Re^2} = 1 \quad \text{Convección combinada}$$

$$\frac{Gr}{Re^2} < 1 \quad \text{Convección forzada}$$

5.4.1 CONVECCIÓN NATURAL

Si se calienta un líquido o un gas, su densidad (masa por unidad de volumen) suele disminuir. Si el líquido o gas se encuentra en el campo gravitatorio, el fluido más caliente y menos denso asciende, mientras

²⁵ FRANK P. INCROPERA, Fundamentos de transferencia de calor. Cap.9

que el fluido más frío y más denso desciende. Este tipo de movimiento, debido exclusivamente a la no uniformidad de la temperatura del fluido, se denomina **convección natural**.

Los valores comunes de h , en $[W/(m^2 \cdot K)]$, oscilan entre 2 y 25 para la convección natural de gases y entre 50 y 1000 para la convección natural de líquidos²⁶.

Para determinar el coeficiente de transferencia de calor por convección natural, se debe determinar el Número de Nusselt, el cual está en función del Número de Rayleigh.

Para el caso de una placa isotérmica (T_s) constante en posición vertical, y un flujo externo de calor uniforme (Us'') constante, dado que Rayleigh $< 10^9$, Churchill y Chu recomiendan el uso de la siguiente ecuación²⁷, por lo que se utilizará en los cálculos del exterior del horno:

$$Nu = 0,68 + \frac{0,670 \cdot Ra^{1/4}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{4/9}} \quad (5.13)$$

²⁶ YUNUS A. CENGEL Y MICHAEL A. BOLES, Termodinámica, Tomo I, Cap.3

²⁷ FRANK P. INCROPERA, Fundamentos de transferencia de calor. Cap.9

Si $Ra > 10^9$

$$Nu = \left[0,825 + \frac{0,387 \cdot Ra^{1/6}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right]^2 \quad (5.14)$$

Para el caso de paredes inclinadas, tenemos la denominada ecuación de Hollands²⁸, que nos sirve para determinar el valor de Nusselt para convección libre de pared inclinada en cavidad interna, que es de la siguiente forma:

$$Nu_N = 1 + 1.44 \left[1 - \frac{1708(\text{sen}(1.8\theta_p))^{1.6}}{Ra \times \cos(\theta_p)} \right] \left[1 - \frac{1708}{Ra \times \cos(\theta_p)} \right]^+ + \left[\left(\frac{Ra \times \cos(\theta_p)}{5830} \right)^{1/3} - 1 \right]^+ \quad (5.15)$$

La notación []⁺ indica que si el valor interno es negativo, se debe igualar a cero.
donde:

Nu_N : Número de Nusselt para convección natural [adimensional]

θ_p : Angulo de inclinación de las paredes, perpendicular del flujo [rad]

Ra: Número de Rayleigh [adimensional]

El Número de Rayleigh se determina de la siguiente forma:

$$Ra = Gr \times Pr \quad (5.16)$$

²⁸ Revista Facultad de Ingeniería U.T.A. (Chile), Vol.4, 1997

donde:

Ra: Número de Rayleigh [adimensional]

Gr: Número de Grashoff [adimensional]

Pr: Número de Prandalt [adimensional]

5.4.2 CONVECCIÓN FORZADA

La convección forzada se logra sometiendo el fluido a un gradiente de presiones, con lo que se fuerza su movimiento de acuerdo a las leyes de la hidrodinámica. El fluido es forzado a fluir en un tubo o sobre una superficie por medios externos como un ventilador, una bomba o el viento.

Para determinar el Número de Nusselt en flujo laminar sobre una placa en convección forzada²⁹, utilizaremos la siguiente ecuación que viene dada por una correlación para convección en tubos no circulares:

$$\text{Nu}_F = 0.664\text{Re}^{\frac{1}{2}}\text{Pr}^{\frac{1}{3}} \quad (5.17)$$

donde:

²⁹ FRANK P. INCROPERA, Fundamentos de transferencia de calor. Cap.6

**Nu_f : Número de Nusselt para convección forzada
[adimensional]**

Re: Número de Reynolds [adimensional]

Pr: Número de Prandtl [adimensional]

5.4.3 CONVECCIÓN COMBINADA

Si se diera el caso en el que la relación $\frac{Gr}{Re^2} = 1$, o lo más cercano a 1, entonces podemos afirmar que la convección es combinada, es decir que vamos a tener tanto convección natural como forzada, en cuyo caso se calculará el Número de Nusselt para los dos tipos de convección, y luego obtendremos Número de Nusselt Total³⁰ de la siguiente forma:

$$Nu = Nu_F \pm Nu_N \quad (5.18)$$

5.5 RADIACIÓN

La radiación presenta una diferencia fundamental respecto a la conducción y la convección: las sustancias que intercambian calor no tienen que estar en contacto, sino que pueden estar separadas por un vacío, o bien que no exista materia entre ellas. La

³⁰ FRANK P. INCROPERA, Fundamentos de transferencia de calor. Cap.9

radiación es un término que se aplica genéricamente a toda clase de fenómenos relacionados con ondas electromagnéticas (o fotones). Algunos fenómenos de la radiación pueden describirse mediante la teoría de ondas, pero la única explicación general satisfactoria de la radiación electromagnética es la teoría cuántica. La transferencia de energía por radiación es más rápida (a la velocidad de la luz) y no sufre atenuación en el vacío. Ésta es exactamente la manera en que la energía del sol llega a la Tierra.

La radiación es un fenómeno volumétrico y todos los sólidos, líquidos y gases emiten, absorben o transmiten radiación en diversos grados. Sin embargo, la radiación suele considerarse como un fenómeno superficial en sólidos que son opacos a la radiación térmica, como los metales, la madera y las rocas, ya que la radiación emitida por las regiones internas de dichos materiales nunca pueden alcanzar la superficie, y la radiación incidente en tales cuerpos suele ser absorbida a unos cuantos micrones de la superficie.

La tasa de radiación máxima que puede emitirse desde una superficie a una temperatura absoluta T_s está dada por la ley de Stefan-Boltzmann³¹ como:

³¹ YUNUS A. CENGEL Y MICHAEL A. BOLES, Termodinámica, Tomo I, Cap.3

$$\dot{Q}_{emit,max} = \sigma \cdot A \cdot T_S^4 \quad (5.19)$$

donde:

\dot{Q}_{emit} : Tasa de radiación máxima [J/s].

A : Área de la superficie que emite o recibe [m²]

σ : Constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma = 5,669 \times 10^{-8}$
[W/m²· K⁴])

La superficie idealizada que emite radiación a esta tasa máxima recibe el nombre de cuerpo negro, y la radiación emitida por un cuerpo negro se llama radiación de cuerpo negro. La radiación emitida por todas las superficies reales es menor que la radiación emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura y se expresa como:

$$\dot{Q}_{emit,max} = \epsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T_S^4 \quad (5.20)$$

donde:

\dot{Q}_{emit} : Tasa de radiación máxima [J/s].

A : Área de la superficie que emite o recibe [m²]

ε : Emisividad de la superficie ($0 \leq \varepsilon \leq 1$)
[adimensional]

σ : Constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma = 5,669 \times 10^{-8}$)
[W/m²· K⁴]

La propiedad de emisividad ε es una medida de lo cerca que una superficie se aproxima a un cuerpo negro, para el cual $\varepsilon = 1$. Las emisividades de algunas superficies se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 5.2. Emisividad de varias superficies³²

MATERIAL	EMISIVIDAD
Hoja de aluminio	0.07
Aluminio anodizado	0.82
Cobre pulido	0.03
Oro pulido	0.03
Plata pulida	0.02
Acero inoxidable pulido	0.17
Pintura negra	0.98

³² YUNUS A. CENGEL Y MICHAEL A. BOLES, Termodinámica, Tomo I, Cap.3

Pintura blanca	0.90
Papel blanco	0.92 – 0.97
Pavimento de asfalto	0.85 – 0.93
Ladrillo rojo	0.93 – 0.96
Piel humana	0.95
Madera	0.82 – 0.92
Suelo	0.93 – 0.96
Agua	0.96
Vegetación	0.92 – 0.96

Otra propiedad importante de la radiación de la superficie es su absorbencia, α , que es la fracción de energía de la radiación incidente sobre una superficie que ésta absorbe. Al igual que la emisividad, su valor está en el intervalo $0 \leq \alpha \leq 1$.³³ Un cuerpo negro absorbe toda la radiación que incide sobre él. Esto es, un cuerpo negro es tanto un absorbedor perfecto ($\alpha = 1$) como un emisor perfecto.

En general, tanto los valores de ε como de α de una superficie dependen de la temperatura y de la longitud de onda de la radiación. La ley de Kirchhoff de la radiación establece que la emisividad y la absorbencia de una superficie son iguales a la misma

³³ YUNUS A. CENGEL Y MICHAEL A. BOLES, Termodinámica, Tomo I, Cap.3

temperatura y longitud de onda. En la mayor parte de las aplicaciones prácticas, se ignora la dependencia de ε y α de la temperatura y la longitud de onda, y la absorbencia promedio de la superficie se considera igual a su emisividad promedio. La tasa a la cual una superficie absorbe radiación se determina de:

$$\dot{Q}_{abs} = \alpha \cdot \dot{Q}_{inc} \quad (5.21)$$

donde \dot{Q}_{inc} es la tasa a la cual la radiación incide sobre la superficie y α es la absorbencia de la superficie. En superficies opacas (no transparentes), la porción de la radiación incidente que no absorbe la superficie se refleja.

La diferencia entre las tasas de radiación emitida por la superficie y la radiación absorbida es la transferencia de calor por radiación neta. Si la tasa de absorción de radiación es mayor que la tasa de emisión de radiación, se dice que la superficie está ganando energía por radiación, de lo contrario la superficie está perdiendo energía por radiación.

En general, determinar la tasa neta de transferencia de calor por radiación entre dos

superficies es una materia complicada, porque depende de las propiedades de las superficies, la orientación relativa entre ellas y la interacción del medio entre las superficies con la radiación. Sin embargo en el caso especial de una superficie relativamente pequeña de emisividad ε y de área de la superficie A a temperatura absoluta T_S , que está completamente encerrada por una superficie mucho más grande a temperatura absoluta T_{air} , separada por una gas (como el aire) que no interacciona con la radiación (esto es, la cantidad de radiación emitida, absorbida o dispersada por el medio es despreciable), la tasa neta de transferencia de calor por radiación entre estas dos superficies se determina a partir de:

$$\dot{Q}_{rad} = \varepsilon \cdot \alpha \cdot A \cdot (T_S^4 - T_{Surr}^4) \quad (5.22)$$

En este caso especial, la emisividad y el área de la superficie circundante no tienen ningún efecto en la transferencia de calor por radiación neta.

5.6 EVAPORACIÓN Y CONDENSACIÓN

5.6.1 INTRODUCCIÓN

La transmisión de calor entre fluidos y sólidos en los casos de flujo bifásico ha adquirido gran importancia ya que en él se basa el diseño de las calderas de vapor, de las calderas en rectificación y evaporación, de los reactores nucleares, etc.

Supongamos una superficie interfacial, líquido puro- vapor saturado puro, plana, a temperatura T_l el primero y a temperatura T_g y presión p_g , el segundo.

La transferencia de materia a través de esta superficie interfacial puede expresarse como flujo neto, n , diferencia entre los flujos correspondientes a las moléculas que llegan a la misma procedentes de la fase vapor n_g y a las moléculas líquidas que la abandonan

n_l :

$$\mathbf{n = n_g - n_l} \quad (5.23)$$

En el equilibrio $n_g=n_l$, hay condensación si $n_g > n_l$ y hay evaporación si $n_l > n_g$.

Por la teoría cinética elemental sabemos que, en cualquier gas a temperatura absoluta T y presión p constantes el valor del flujo molecular en unidades másicas es:

$$\mathbf{n = [M / (2\pi R)]^{1/2} p / T^{1/2}} \quad (5.24)$$

Ya que durante la evaporación o condensación, las condiciones en la superficie interfacial no son de equilibrio, no debería utilizarse la expresión anterior para representar los flujos de moléculas frías y calientes, pero dada la dificultad para estudiar el problema con mayor rigor se supondrá que las

condiciones dinámicas son próximas al equilibrio. Por lo tanto de las dos ecuaciones anteriores se deduce:

$$n = [M / (2\pi R)]^{1/2} (p_g / T_g^{1/2} - p_l / T_l^{1/2}) \quad (5.25)$$

Esta ecuación presenta otros dos errores importantes aparte del que ya supone la aproximación ya mencionada:

- No todas las moléculas de vapor que inciden sobre la superficie interfacial condensan. Lo hacen solamente una fracción ψ_g , pues las restantes, por incidir demasiado oblicuamente sobre aquélla retornan a la fase vapor.
- No todas las moléculas de líquido que emergen de la superficie interfacial la abandonan definitivamente, debido a sus choques con las moléculas de vapor incidentes. La fracción de moléculas de líquido que realmente escapan es ψ_l .

Para corregir estos errores se introdujeron una serie de factores correctivos que llevaron a la siguiente ecuación:

$$n = 2\psi/(2-\psi) [M / (2\pi RT)]^{1/2} \Delta p \quad (5.26)$$

Para que haya condensación debe cumplirse la condición $p_g > p_l$.

Si manteniendo la temperatura constante la presión del vapor se incrementa en Δp , el flujo neto de condensación se expresará por la última ecuación mencionada. La temperatura de saturación que corresponde a la nueva presión $p+\Delta p$ es $T_s+\Delta T$. Otra forma de interpretar este fenómeno de condensación es que el líquido debe subenfriarse ΔT por debajo de la

temperatura de saturación $T_s + \Delta T$ que corresponde a un vapor a presión $p + \Delta p$, para que la condensación tenga lugar. Por ello, aunque se desprece la caída de temperatura en la superficie interfacial, el subenfriamiento ΔT permite definir un *coeficiente de transmisión de calor interfacial*, h_i , como cociente entre el flujo energético debido a la condensación y la indicada diferencia de temperaturas:

$$h_i = n\lambda/\Delta T \quad (5.27)$$

Usando las ecuaciones 5.26 y 5.27 tenemos:

$$h_i \cong 2\psi/(2-\psi) [M / (2\pi RT)]^{1/2} \lambda^2 / (Tv_g) = 2\psi/(2-\psi) [M / (2\pi RT)]^{1/2} \lambda^2 pM/RT^2 \quad (5.28)$$

Hay factores que afectan la resistencia interfacial tales como la presencia de gases no condensables. El gas no condensable es arrastrado por el vapor hacia la superficie interfacial donde se acumula, produciéndose en ella un aumento de su presión parcial por encima de la correspondiente al seno de la mezcla gaseosa, estableciéndose una fuerza impulsora que motiva su difusión desde la superficie interfacial al seno del gas. Esta difusión es exactamente contrarrestada por el desplazamiento del vapor hacia la superficie indicada.

Como la presión total permanece constante, la presión parcial del vapor en la superficie interfacial es inferior a la que tiene en el seno del gas, estableciéndose la fuerza impulsora para la difusión indicada.

El flujo de vapor en su difusión a través del gas inerte, insoluble en el líquido tiene por expresión:

$$n = k_g (p_g - p_{gi}) \quad (5.29)$$

donde k_g representa el coeficiente de transferencia del vapor y está dado por:

$$k_g = D_g / (RT\delta) \quad p / (p - p_{gi})_{ml} \quad (5.30)$$

representando D_g el coeficiente de difusión del vapor en la mezcla y δ el espesor de la subcapa laminar a través de la que tiene lugar la difusión.

La transmisión de calor desde el seno del gas a la superficie interfacial implica dos contribuciones: el calor sensible del gas y el calor latente liberado por el vapor al condensar en la interfase:

$$q = h(T - T_i) + k_g M_g (p_g - p_{gi}) \lambda \quad (5.31)$$

Si tenemos el gas en reposo sólo se considera el segundo término del segundo miembro de esta ecuación.

El cálculo del coeficiente de transferencia de materia k_g mediante la ecuación dada, considerando

sólo la difusión como mecanismo de transferencia del vapor, conduce a un valor de q inferior al real para un gradiente de temperatura dado.

Si la mezcla gaseosa circula paralelamente a la interfase, el coeficiente de transmisión de calor, h , de la ecuación 5.31 se calcula mediante la correlación que corresponda al régimen de flujo de que se trate, bien sea éste interno o externo.

Si el flujo de vapor, n , hacia la superficie interfacial es grande el valor del coeficiente de transmisión de calor h , calculado del modo indicado, puede quedar afectado por aquél, en este caso deberá corregirse.

Normalmente se desconocerán las condiciones de la interfase y deberá recurrirse a un cálculo por tanteos para poder aplicar la ecuación 5.31. También debemos tener en cuenta que dicha ecuación deberá aplicarse a los distintos puntos de la interfase, pues los coeficientes de transporte tienen valores puntuales.

5.6.2 CONDENSACIÓN

La condensación de vapores puede producirse de distintos modos:

- Película.
- En gotas.
- Homogénea: **Se desarrolla en forma de niebla en el seno de un gas al disminuir la temperatura del vapor por debajo de la de condensación.**
- Por contacto directo: **Cuando se produce sobre una superficie un líquido frío con el que se pone en contacto el vapor.**
- Bifásica: **Si por tratarse de una mezcla de varios vapores, su condensación conduce a líquidos inmiscibles.**

Desde el punto de vista industrial la que tiene mayor interés es la condensación en película.

a) Condensación en película.

a.1) Condensación sobre una superficie plana vertical.

El estudio que se lleva a cabo a continuación también es válido para tubos verticales cuyo diámetro sea muy superior al espesor de la película de condensado.

Partimos de las siguientes suposiciones:

- Flujo laminar del condensado descendente.
- Propiedades físicas del condensado prácticamente constantes, evaluadas a la temperatura de la película $(T_g + T_p)/2$.
- Temperatura de la superficie T_p constante.
- Vapor saturado con temperatura de saturación constante.
- Distribución lineal de la temperatura en la película de condensado.
- Efectos de inercia despreciables.
- Ausencia de ondulaciones en la superficie de condensado.
- Pequeña velocidad del vapor: rozamiento en la superficie líquido - vapor despreciable.

Puesto que el calor que se transmite a través de la película de condensado, es el procedente de la condensación del vapor, y lo es por conducción, tendremos:

$$q = \lambda \cdot G_c = k_{liq} (T_s - T_p) / E \quad (5.32)$$

donde G_c es el flujo másico de condensación que está dado por:

$$G_c = \frac{\rho_l \cdot (\rho_l - \rho_g)}{\mu_l \cdot g \cdot E^2 \cdot \frac{\partial E}{\partial z}} \quad (5.33)$$

El coeficiente de transmisión de calor individual media para una superficie vertical de altura L es el siguiente:

$$h_m = 1,47 \cdot \left(\frac{\rho_l (\rho_l - \rho_g) \cdot g \cdot k_{liq}^3}{\mu_l^2} \right)^{1/3} \cdot Re_L^{-1/3} \quad (5.34)$$

Donde Re_L es el número de Reynolds del condensado en la base de la superficie:

$$Re_L = 4 \cdot \Gamma_L / \mu_l \quad (5.35)$$

Al iniciar este análisis nos hemos basado en una serie de suposiciones, por lo cual, luego de varias correcciones a las suposiciones, llegamos a que:

$$h = 0,056 \cdot \left[\frac{\rho_l (\rho_l - \rho_g) \cdot g \cdot k_{liq}^3}{\mu_l^2} \right]^{1/3} \cdot Pr_l^{1/3} \cdot Re_l^{0,2} \quad (5.36)$$

Si las superficies planas o los tubos cilíndricos a los que puede aplicarse el tratamiento de aquéllas, forman un ángulo α distinto de cero con la horizontal, son válidas todas las ecuaciones deducidas sustituyendo el valor de la gravedad, g , siempre que aparezca en ellas por el producto ($g \text{ sen}\alpha$).

5.7 TEMPERATURA DEL PROCESO DE SECADO

La temperatura es uno de los factores que controlan la velocidad de evaporación de un alimento, es decir, a mayor temperatura de aire mayor velocidad de evaporación y mayor capacidad de aire para absorber la humedad liberada por el producto. Cuando el contenido de humedad de un alimento es mayor este puede soportar menor temperatura, ya que una evaporación más rápida del agua superficial puede provocar graves lesiones en el alimento.

Durante la fase inicial de secado se utilizan bajas temperaturas de aire y luego se va incrementando a

medida que avanza el proceso de deshidratación, ya que durante un proceso de deshidratación, la vaporización de la últimas trazas de agua exige más energía, por cuanto el agua que resta en el alimento se encuentra unida más firmemente a la materia seca y se vuelve por lo tanto más difícil de eliminar.

La temperaturas óptimas de trabajo dependen del tipo de alimento a secar. Como norma general se tiene que las mayores economías durante el secado se consiguen cuando se trabaja con las máximas temperaturas que puede soportar el alimento.

5.8 VELOCIDAD DE SECADO

Se define a la velocidad de secado como la pérdida de humedad en un producto por unidad de tiempo, y más exactamente por el cociente diferencial ($-dX / dt$) operando en condiciones constantes de secado, es decir, con aire cuyas condiciones de temperatura, presión, humedad y velocidad permanecen constantes con el tiempo.

5.8.1 Velocidad de secado constante

La velocidad de secado constante puede ser deducida a partir de consideraciones de transferencia de calor o masa. Considerando que el mecanismo de transferencia de calor dominante durante el proceso de secado es únicamente la convección, la velocidad de secado constante puede ser calculada a partir de la siguiente ecuación:

$$R_c = \frac{U \cdot A}{h_{fg}} (T_{bs} - T_s) \quad (5.37)$$

donde:

R_c : Velocidad de secado constante [kg_{agua} / s]

U : Coeficiente global de transferencia de calor [W / (m² x °C)]

A : Área de evaporación [m²]

h_{fg} : Calor latente de vaporización [J / kg]

T_{bs} : Temperatura de bulbo seco – aire de secado [°C]

T_s : Temperatura de la superficie del producto [°C]

El coeficiente global de transferencia de calor depende del mecanismo de paso del calor hacia el

producto fresco. Considerando que la transmisión de calor se efectúa únicamente por convección del aire a la superficie húmeda, se tiene:

$$U = h \quad (5.38)$$

donde:

U : Coeficiente global de transferencia de calor [W / (m² x °C)]

h : Coeficiente de transferencia de calor por convección [W / (m² x °C)]

Como el flujo de aire es paralelo a la superficie, el coeficiente de transferencia de calor por convección viene dado por:

$$h = 0,0204 \cdot G^{0.8} \quad (5.39)$$

donde:

h : Coeficiente de transferencia de calor por convección [W / (m² x °C)]

G : Flujo másico de aire [kg / (m² x h)]

El flujo másico de aire se determina mediante la siguiente ecuación:

$$G = V_A \cdot \rho_A \quad (5.40)$$

donde:

G : Flujo másico de aire [kg / (m² x s)]

V_A : Velocidad del aire de secado [m / s]

ρ_A : Densidad del aire de secado [kg / m³]

Asumiendo que el calor llega exclusivamente por convección a la superficie húmeda del producto,

tenemos que:

$$T_s = T_{bh} \quad (5.41)$$

donde:

T_s : Temperatura de la superficie del producto [°C]

T_{bh} : Temperatura de bulbo húmedo del aire de secado [°C]

a) Efecto de diferentes variables sobre la velocidad de secado constante

– Velocidad del aire: **Si la radiación y conducción a través del producto son despreciables, R_c es proporcional a G^{0,8} para flujo paralelo, pero si la**

radicación y conducción son significativas, el efecto de la velocidad del aire suele ser poco importante.

- Temperatura del aire: Al aumentar la temperatura del aire aumenta la magnitud $(T_{bs} - T_s)$ y por tanto aumenta R_c . En ausencia de los efectos de radiación y despreciando la variación del calor latente de vaporización para intervalos moderados de temperatura, R_c es proporcional a $(T_{bs} - T_s)$ de acuerdo con la Ecuación (5.37).**
- Humedad del aire: Al aumentar la humedad del aire de secado disminuye la velocidad de secado (R_c).**
- Espesor del producto: Al aumentar el espesor del producto, disminuye el área de contacto por unidad de volumen, y por consiguiente, disminuye R_c .**

5.8.2 Velocidad de secado decreciente

Si no conocemos la forma en que varía la velocidad de secado decreciente, podemos obtener una expresión aproximada suponiendo que la variación es lineal, desde la humedad crítica hasta la humedad final del producto, mediante la siguiente ecuación:

$$R''_d = m \cdot X \quad (5.42)$$

donde:

R''_d : Velocidad de secado en el periodo postcrítico [Kg_{agua} / (m² x min)]

m : Pendiente de la recta [Kg_{masa seca} / (m² x min)]

X : Contenido de humedad en base seca [Kg_{agua} / Kg_{masa seca})]

5.9 TIEMPO DE SECADO

El tiempo total de secado de un producto puede ser determinado a partir de la siguiente ecuación, tomando como límites de integración a la humedad inicial y final del producto.

$$t_T = \int_{X_f}^{X_i} \frac{dX}{R}$$

(5.43)

donde:

t_T : Tiempo total de secado [s]

R : Velocidad de secado [Kg agua / (s * Kg masa seca)]

Para calcular esta integral es necesario conocer $R = f (X)$, por lo que es más conveniente calcular el tiempo de secado de los períodos de velocidad constante y velocidad decreciente por separado y luego encontrar el tiempo total.

$$t_T = t_c + t_d$$

(5.44)

donde:

t_T : Tiempo total de secado [s]

t_c : Tiempo de secado correspondiente al periodo de velocidad constante [s]

constante [s]

t_d : Tiempo de secado correspondiente al período de velocidad decreciente [s]

decreciente [s]

5.9.1 TIEMPO DE SECADO CORRESPONDIENTE AL PERÍODO DE VELOCIDAD CONSTANTE

Es el tiempo necesario para que la humedad del producto descienda desde su valor inicial (X_i) hasta su valor crítico (X_{cr}). A este tiempo se lo denomina muchas veces tiempo crítico (t_c).

Tomando la Ecuación 5.43, siendo la velocidad de secado constante en este período, y tomando como límites de integración a la humedad inicial (X_i) y a la humedad crítica (X_c), la solución es la siguiente:

$$t_c = \frac{X_i - X_c}{R_c} \quad (5.45)$$

donde:

t_c : Tiempo de secado correspondiente al periodo de velocidad constante [s]

X_i : Humedad inicial del producto [Kg_{agua} / Kg_{masa seca}]

X_{cr} : Humedad crítica del producto [Kg_{agua} / Kg_{masa seca}]

R_c : Velocidad de secado constante [Kg_{agua} / s * Kg_{masa seca}]

5.9.2 TIEMPO DE SECADO CORRESPONDIENTE AL PERÍODO DE VELOCIDAD DECRECIENTE

Suponiendo que la velocidad de secado en este periodo varía linealmente, desde la humedad crítica hasta la humedad de equilibrio, se puede obtener una expresión aproximada para el cálculo del tiempo:

$$t_d = \frac{X_c - X_{eq}}{R_c} \cdot \ln \frac{X_c - X_{eq}}{X_f - X_{eq}} \quad (5.46)$$

donde:

t_d : Tiempo de secado correspondiente al período de velocidad

decreciente [s]

X_c : Humedad crítica del producto [Kg agua / Kg masa seca]

X_{eq} : Humedad de equilibrio [Kg agua / Kg masa seca]

X_f : Humedad final del producto [Kg agua / Kg masa seca]

R_c : Velocidad de secado constante [Kg agua / s * Kg masa seca]

CAPÍTULO 6

DISEÑO DEL SISTEMA DE SECADO DE FRUTAS

6.1 PARÁMETROS DE DISEÑO

6.1.1 PROPIEDADES DEL AIRE

Lo primero que se debe conocer son las propiedades ambientales del sector donde trabajará el equipo, debido a que la deshidratación es un proceso psicrométrico.

El horno trabajará en la ciudad de Quito a 2850 msnm, y la presión atmosférica de acuerdo a la altitud está determinada por la ecuación¹:

$$P_{atm} := 101325 \left(\frac{288 - 0.0065 \cdot z}{288} \right)^{5.256} \quad (6.1)$$

En donde:

P_{atm} : Presión atmosférica / [Pa]

z : Altura exacta de la ubicación / [m]

Obtenida la presión exacta de la ubicación podemos calcular la densidad del aire con la expresión siguiente:

$$\rho_a := \frac{P_{atm}}{R_A \cdot T_A} \quad (6.2)$$

En donde:

ρ_a : Densidad del aire / [kg/m³]

R_A : Constante de los gases ideales / 0.2870[KPam³/Kg^oK]

T_A : Temperatura del aire ambiente / [°K]

Con las siguientes temperaturas y humedades relativas para la ciudad de Quito, se pueden obtener los promedios necesarios a utilizarse.

Tabla 6.1. Temperatura y humedad relativa promedio para Quito.

Año	Mes	Temperatura [°C]	Humedad Relativa [°C]
2005	Julio	15,0	62
	Agosto	16,3	58
	Septiembre	16,1	66
	Octubre	15,2	63
	Noviembre	15,9	66
	Diciembre	15,8	67
2006	Enero	15,9	74
	Febrero	16,0	75
	Marzo	15,7	77
	Abril	16,5	77
	Mayo	15,9	75
	Junio	15,3	72

Fuente: INAMHI, Estación Iñaquito.

Con los valores de presión atmosférica, altura y los promedios de temperatura y humedad relativa de la tabla 6.1, podemos obtener las propiedades restantes del aire, utilizando el programa Akton Psychrometric Chart.

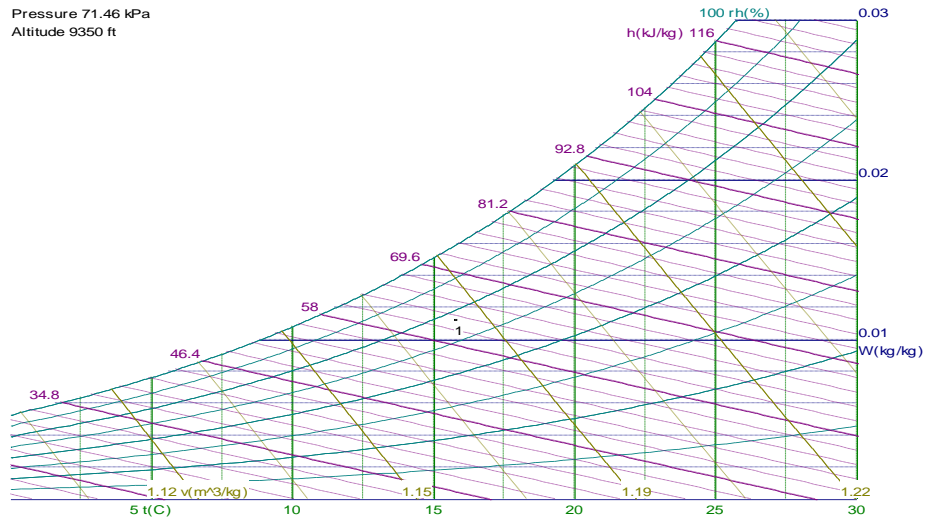


Figura 6.1. Carta Psicrométrica. Programa Akton

Ahora tenemos los datos siguientes en el punto (1) de la figura 6.1.

Tabla 6.2. Propiedades del aire a temperatura ambiente

PROPIEDAD	CANTIDAD	UNIDAD
Presión atmosférica	71.44	KPa
Densidad	0.861	Kg/m ³
Temperatura de aire	15.8	°C
Humedad relativa	69.0	%
Humedad específica	0.0111	Kg _{agua} /Kg _{aire fresco}
Volumen específico	1.168	m ³ /Kg
Entalpía	62.08	KJ/Kg
Temperatura bulbo húmedo	12.3	°C
Temperatura de rocío	10.6	°C

Valores calculados con el Programa Akton

6.1.2 PROPIEDADES DE LOS PRODUCTOS A SECAR

Las propiedades de los productos a secar varían de acuerdo a su variedad y tiempo de cosecha.

Por ejemplo las humedades en base húmeda utilizadas fue del 80% para la uvilla, del 75% para la manzana y del 85% para el durazno.

En base a estos parámetros, se realizan los siguientes cálculos para cada una de las frutas:

Para la Uvilla:

$$P_{\text{unit}} := 3\text{g}$$

$$\phi_{\text{prom}} := 1.4\text{cm}$$

$$A_{\text{S}} := 1.54\text{cm}^2$$

$$V_{\text{u}} := 1.437 \cdot 10^{-6} \text{m}^3$$

$$\rho_{\text{u}} := 2.09 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

$$X_{\text{wo}} := 0.8$$

$$X_{\text{wf}} := 0.12$$

$$S_{\text{w}} := 0.003\text{kg}$$

$$W_{\text{o}} := S_{\text{w}} \cdot X_{\text{wo}}$$

$$W_{\text{o}} = 2.4 \times 10^{-3} \text{kg}$$

$$S_{\text{d}} := S_{\text{w}} - W_{\text{o}}$$

$$S_{\text{d}} = 6 \times 10^{-4} \text{kg}$$

$$X_{\text{do}} := \frac{W_{\text{o}}}{S_{\text{d}}}$$

$$X_{\text{do}} = 4$$

$$S_{\text{wf}} := \frac{S_{\text{d}} \cdot 100}{(100 - 12)}$$

$$S_{\text{wf}} = 6.818 \times 10^{-4} \text{kg}$$

$$W_f := S_{wf} \cdot X_{wf}$$

$$W_f = 8.182 \times 10^{-5} \text{ kg}$$

$$X_{df} := \frac{W_f}{S_d}$$

$$X_{df} = 0.136$$

Humedad de equilibrio $X_{eq} := 0.045$

$$S_{eq} := \frac{S_d \cdot 100}{(100 - 4.5)}$$

$$S_{eq} = 6.283 \times 10^{-4} \text{ kg}$$

$$W_{eq} := S_{eq} \cdot X_{eq}$$

$$W_{eq} = 2.827 \times 10^{-5} \text{ kg}$$

$$X_{deq} := \frac{W_{eq}}{S_d}$$

$$X_{deq} = 0.047$$

Humedad critica

$$X_c := 0.6$$

$$S_{wc} := \frac{S_d \cdot 100}{(100 - 60)}$$

$$S_{wc} = 1.5 \times 10^{-3} \text{ kg}$$

$$W_c := S_{wc} \cdot X_c$$

$$W_c = 9 \times 10^{-4} \text{ kg}$$

$$X_{dc} := \frac{W_c}{S_d}$$

$$X_{dc} = 1.5$$

Tabla 6.3. Características de la Uvilla

Propiedades	Símbolo	Valor	Unidades
Peso Unitario	P_U	3	gr
Diámetro Promedio	D_U	1.4	cm
Área Superficial Promedio	A_S	1.54	cm^2
Volumen Promedio	V_U	1.437×10^{-6}	m^3
Densidad	ρ_U	2.09	gr/cm^3
Humedad Inicial	X_{wo}	80	%
Humedad en Base Seca Inicial	X_{do}	4	$\text{Kg}_{\text{agua}}/\text{Kg}_{\text{seco}}$
Humedad Final	X_{wf}	12	%
Humedad en Base Seca Final	X_{df}	0.136	$\text{Kg}_{\text{agua}}/\text{Kg}_{\text{seco}}$
Humedad de Equilibrio	X_{eq}	4.5	%
Humedad en Base Seca Equilibrio	X_{deq}	0.047	$\text{Kg}_{\text{agua}}/\text{Kg}_{\text{seco}}$
Humedad Critica	X_c	60	%
Humedad en Base Seca Critica	X_{dc}	1.5	$\text{Kg}_{\text{agua}}/\text{Kg}_{\text{seco}}$

Para la manzana (rodaja):

$$P_{\text{unit}} := 6.3\text{g}$$

$$\phi_{\text{prom}} := 5\text{cm}$$

$$A_S := 18.81\text{cm}^2$$

$$\rho_U := 840 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$X_{wo} := 0.75$$

$$X_{wf} := 0.12$$

$$S_w := 0.0063\text{g}$$

$$W_o := S_w \cdot X_{wo}$$

$$W_o = 4.725 \times 10^{-3} \text{kg}$$

$$S_d := S_w - W_o$$

$$S_d = 1.575 \times 10^{-3} \text{ kg}$$

$$X_{do} := \frac{W_o}{S_d}$$

$$X_{do} = 3$$

$$S_{wf} := \frac{S_d \cdot 100}{(100 - 12)}$$

$$S_{wf} = 1.79 \times 10^{-3} \text{ kg}$$

$$W_f := S_{wf} \cdot X_{wf}$$

$$W_f = 2.148 \times 10^{-4} \text{ kg}$$

$$X_{df} := \frac{W_f}{S_d}$$

$$X_{df} = 0.136$$

Humedad de equilibrio $X_{eq} := 0.045$

$$S_{eq} := \frac{S_d \cdot 100}{(100 - 4.5)}$$

$$S_{eq} = 1.649 \times 10^{-3} \text{ kg}$$

$$W_{eq} := S_{eq} \cdot X_{eq}$$

$$W_{eq} = 7.421 \times 10^{-5} \text{ kg}$$

$$X_{deq} := \frac{W_{eq}}{S_d}$$

$$X_{deq} = 0.047$$

Humedad critica

$$X_c := 0.6$$

$$S_{wc} := \frac{S_d \cdot 100}{(100 - 60)}$$

$$S_{wc} = 3.938 \times 10^{-3} \text{ kg}$$

$$W_c := S_{wc} \cdot X_c$$

$$W_c = 2.362 \times 10^{-3} \text{ kg}$$

$$X_{dc} := \frac{W_c}{S_d}$$

$$X_{dc} = 1.5$$

Tabla 6.4. Características de la Manzana

Propiedades	Símbolo	Valor	Unidades
Peso Unitario-rodaja	P	6.3	gr
Diámetro Promedio-rodaja	D	5	cm
Espesor Promedio-rodaja	e	0.5	cm
Densidad	ρ	8.4	gr/cm ³
Humedad Inicial	X_{wo}	75	%
Humedad en Base Seca Inicial	X_{do}	3	Kg _{agua} /Kg _{seco}
Humedad Final	X_{wf}	12	%
Humedad en Base Seca Final	X_{df}	0.136	Kg _{agua} /Kg _{seco}
Humedad de Equilibrio	X_{eq}	4.5	%
Humedad en Base Seca Equilibrio	X_{deq}	0.047	Kg _{agua} /Kg _{seco}
Humedad Critica	X_c	60	%
Humedad en Base Seca Critica	X_{dc}	1.5	Kg _{agua} /Kg _{seco}

Para el durazno (rodaja):

$$P_{unit} := 4g$$

$$\phi_{prom} := 2.5cm$$

$$A_s := 11.39cm^2$$

$$\rho_u := 830 \frac{kg}{m^3}$$

$$X_{wo} := 0.85$$

$$X_{wf} := 0.12$$

$$S_w := 0.004kg$$

$$W_o := S_w \cdot X_{wo}$$

$$W_o = 3.4 \times 10^{-3} kg$$

$$S_d := S_w - W_o$$

$$S_d = 6 \times 10^{-4} \text{ kg}$$

$$X_{do} := \frac{W_o}{S_d}$$

$$X_{do} = 5.667$$

$$S_{wf} := \frac{S_d \cdot 100}{(100 - 12)}$$

$$S_{wf} = 6.818 \times 10^{-4} \text{ kg}$$

$$W_f := S_{wf} \cdot X_{wf}$$

$$W_f = 8.182 \times 10^{-5} \text{ kg}$$

$$X_{df} := \frac{W_f}{S_d}$$

$$X_{df} = 0.136$$

Humedad de equilibrio $X_{eq} := 0.045$

$$S_{eq} := \frac{S_d \cdot 100}{(100 - 4.5)}$$

$$S_{eq} = 6.283 \times 10^{-4} \text{ kg}$$

$$W_{eq} := S_{eq} \cdot X_{eq}$$

$$W_{eq} = 2.827 \times 10^{-5} \text{ kg}$$

$$X_{deq} := \frac{W_{eq}}{S_d}$$

$$X_{deq} = 0.047$$

Humedad critica

$$X_c := 0.6$$

$$S_{wc} := \frac{S_d \cdot 100}{(100 - 60)}$$

$$S_{wc} = 1.5 \times 10^{-3} \text{ kg}$$

$$W_c := S_{wc} \cdot X_c$$

$$W_c = 9 \times 10^{-4} \text{ kg}$$

$$X_{dc} := \frac{W_c}{S_d}$$

$$X_{dc} = 1.5$$

Tabla 6.5. Características del Durazno

Propiedades	Símbolo	Valor	Unidades
Peso Unitario-rodaja	P_U	4	gr
Diámetro Promedio-rodaja	D_U	2.5	cm
Espesor Promedio-rodaja	A_S	0.5	cm ²
Densidad	ρ_U	8.3	gr/cm ³
Humedad Inicial	X_{wo}	85	%
Humedad en Base Seca Inicial	X_{do}	5.67	Kg _{agua} /Kg _{seco}
Humedad Final	X_{wf}	12	%
Humedad en Base Seca Final	X_{df}	0.136	Kg _{agua} /Kg _{seco}
Humedad de Equilibrio	X_{eq}	4.5	%
Humedad en Base Seca Equilibrio	X_{deq}	0.047	Kg _{agua} /Kg _{seco}
Humedad Critica	X_c	60	%
Humedad en Base Seca Critica	X_{dc}	1.5	Kg _{agua} /Kg _{seco}

6.1.3 CARGA DE SECADO

La cámara de secado tendrá una capacidad de carga de 55Kg de producto fresco en un proceso por lotes.

Para la Uvilla:

Carga de producto:

$$C_f := 55\text{kg}$$

Cantidad de agua a evaporar

$$w_o := 0.0024\text{kg}$$

$$w_f := 0.00008181\text{kg}$$

$$\text{kg}_{\text{H}_2\text{Oev}} := w_o - w_f$$

$$\text{kg}_{\text{H}_2\text{Oev}} = 2.318 \times 10^{-3} \text{kg}$$

$$C_{ev} := \text{kgH}_2\text{O}_{ev} \cdot \frac{C_f}{S_w}$$

$$C_{ev} = 42.5 \text{ kg}$$

Masa de producto final deshidratado

$$C_d := C_f - C_{ev}$$

$$C_d = 12.5 \text{ kg}$$

Masa seca de la carga:

$$C_s := S_d \cdot \frac{C_f}{S_w}$$

$$C_s = 11 \text{ kg}$$

Para la Manzana:

Carga de producto:

$$C_f := 55 \text{ kg}$$

Cantidad de agua a evaporar

$$w_o := 0.004725 \text{ kg}$$

$$w_f := 0.000278 \text{ kg}$$

$$\text{kgH}_2\text{O}_{ev} := w_o - w_f$$

$$\text{kgH}_2\text{O}_{ev} = 4.447 \times 10^{-3} \text{ kg}$$

$$C_{ev} := \text{kgH}_2\text{O}_{ev} \cdot \frac{C_f}{S_w}$$

$$C_{ev} = 38.823 \text{ kg}$$

Masa de producto final deshidratado:

$$C_d := C_f - C_{ev}$$

$$C_d = 16.177 \text{ kg}$$

Masa seca de la carga:

$$C_s := S_d \cdot \frac{C_f}{S_w}$$

$$C_s = 13.75 \text{ kg}$$

Para el durazno:

Carga de producto:

$$C_f := 55 \text{ kg}$$

Cantidad de agua a evaporar:

$$w_o := 0.00328 \text{ kg}$$

$$w_f := 0.000127 \text{ kg}$$

$$\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}_{ev}} := w_o - w_f$$

$$\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}_{ev}} = 3.153 \times 10^{-3} \text{ kg}$$

$$C_{ev} := \text{kg}_{\text{H}_2\text{O}_{ev}} \cdot \frac{C_f}{S_w}$$

$$C_{ev} = 43.354 \text{ kg}$$

Masa de producto final deshidratado:

$$C_d := C_f - C_{ev}$$

$$C_d = 11.646 \text{ kg}$$

Masa seca de la carga:

$$C_s := S_d \cdot \frac{C_f}{S_w}$$

$$C_s = 8.25 \text{ kg}$$

Tabla 6.6. Carga de Producto

Datos	Símbolo	Uvilla	Manzana	Durazno	Unidad
Capacidad de carga producto fresco	C_f	55	55	55	Kg
Cantidad de agua a evaporar	C_{ev}	42.5	38.82	43.35	Kg
Masa de producto final deshidratado	C_d	12.5	16.18	11.65	Kg
Masa seca de la carga	C_s	11	13.75	8.25	kg

La humedad final recomendada es del 12% según el laboratorio de alimentos del Instituto Agropecuario Superior Andino, por lo que el índice de reducción de la uvilla es de 4.7, de la manzana 3.4 y del durazno 4.7.

6.1.4 TEMPERATURA DEL AIRE DE SECADO

La temperatura en el proceso de secado varía dependiendo de la fruta, por lo que a continuación se muestra el rango de las temperaturas recomendadas y utilizadas para cada caso:

Tabla 6.7. Temperaturas de Secado³⁴

Fruta	Temp. Mínima [°C]	Temp. Máxima [°C]	Temp. Utilizada [°C]
Uvilla	40	50	45
Manzana	60	75	70
Durazno	55	75	70

³⁴ Joslyn., M.A. 1963 Food Processing by Drying and Dehydration". Vol.2 AVI Publishing Co., Westport. Conn

El horno se precalienta a 40°C y una vez realizada la carga del producto se incrementa a la temperatura indicada.

En el interior de la cámara, el aire ingresa a temperatura ambiente y se lo calienta para obtener la temperatura de trabajo necesaria. La deshidratación comienza a una temperatura de 45°C hasta un máximo de 70°C. La humedad relativa máxima en el interior de la cámara debe ser menor al 60%.

Ahora de la misma manera obtenemos las características del aire en las condiciones máximas de trabajo en el interior del horno.

Tabla 6.8. Propiedades del aire a temperatura máxima de trabajo

PROPIEDAD	CANTIDAD	UNIDAD
Temperatura de aire	70	°C
Humedad relativa	53.6	%
Humedad específica	0.186	Kg _{agua} /Kg _{aire fresco}
Volumen específico	1.791	m ³ /Kg
Entalpía	578.9	KJ/Kg
Temperatura bulbo húmedo	56.8	°C
Temperatura de rocío	56.2	°C

Valores calculados con el Programa Akton

6.1.5 TIEMPO DE SECADO

Debido a que el tiempo de secado es inversamente proporcional a la temperatura aplicada a cada producto, es necesario conocer las características de los mismos y realizar pruebas experimentales para establecer los parámetros técnicos óptimos para cada caso.

Para la Uvilla:

$$A_{Tsec} := 4.4m^2$$

$$\Delta h_{fg} := 2394.8 \cdot 10^3 \frac{J}{kg}$$

$$R_c := \frac{\alpha \cdot A_{Tsec}}{\Delta h_{fg}} \cdot (T - T_{bh})$$

$$R_c = 9.755 \times 10^{-4} \frac{kg}{s}$$

$$X_{do} := 4$$

$$X_{dc} := 1.5$$

$$C_s := 11kg$$

$$t_c := \left(\frac{X_{do} - X_{dc}}{3600 \frac{s}{h} \cdot R_c} \right) \cdot C_s$$

$$t_c = 7.83h$$

Para la Manzana:

$$A_{Tsec} := 4.4m^2$$

$$\Delta h_{fg} := 2358.8 \cdot 10^3 \frac{J}{kg}$$

$$R_c := \frac{\alpha \cdot A_{Tsec}}{\Delta h_{fg}} \cdot (T - T_{bh})$$

$$R_c = 1.02 \times 10^{-3} \frac{kg}{s}$$

$$X_{do} := 3$$

$$X_{dc} := 1.86$$

$$C_s := 13.75kg$$

$$t_c := \left(\frac{X_{do} - X_{dc}}{3600 \frac{s}{h} \cdot R_c} \right) \cdot C_s$$

$$t_c = 4.267h$$

Para el durazno:

$$A_{Tsec} := 4.4m^2$$

$$\Delta h_{fg} := 2358.8 \cdot 10^3 \frac{J}{kg}$$

$$R_c := \frac{\alpha \cdot A_{Tsec}}{\Delta h_{fg}} \cdot (T - T_{bh})$$

$$R_c = 1.66 \times 10^{-3} \frac{kg}{s}$$

$$X_{do} := 4.55$$

$$X_{dc} := 1.71$$

$$C_s := 9.9kg$$

$$t_c := \left(\frac{X_{do} - X_{dc}}{3600 \frac{s}{h} \cdot R_c} \right) \cdot C_s$$

$$t_c = 4.705h$$

6.1.6 VELOCIDAD DEL AIRE DE SECADO

La velocidad del flujo de aire entre las bandejas³⁵ debe ser de (1 - 7m/s), para nuestro caso el flujo está entre (1 – 2m/s).

La velocidad de flujo medido en la cámara es de 1.8m/s por lo que cumple con lo parámetros antes mencionados y permanece constante en todo el proceso de deshidratación de cada una de las frutas.

6.2 DISEÑO DEL HORNO DE SECADO

6.2.1 DISEÑO DE LA CÁMARA

Este es un horno poliédrico inclinado de ocho lados, y dimensionado por el posicionamiento y número de bandejas, capaces de contener 55Kg. de fruta fresca (uvilla, manzana y durazno).

6.2.1.1 Bandejas

Las bandejas deben ser diseñadas bajo tres parámetros básicos:

- Las características de los productos a deshidratar.
- La capacidad del horno, en nuestro caso 55Kg de fruta fresca.
- La facilidad de manejo para el operador con un diseño ergonómico que le permita levantar solo o con otra persona un peso inferior a 25Kg.

Las bandejas utilizadas en nuestro horno serán rectangulares con las dimensiones siguientes:

largo [m]	ancho [m]	altura [m]
1.00	0.55	0.04

³⁵ Joslyn., M.A. 1963 Food Processing by Drying and Dehydration". Vol.2 AVI Publishing Co., Westport. Conn.

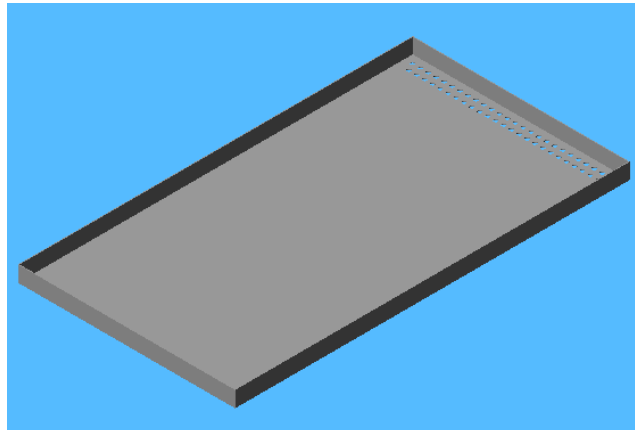


Figura 6.2. Bandeja de acero inoxidable.

La colocación de producto en las bandejas se da con un factor de carga para cada fruta. El mismo que no debe ser muy alto para obtener uniformidad en el secado y no exceder en los tiempos estimados para la deshidratación.

El durazno y la manzana son colocados pelados con cuchillos plásticos para evitar la oxidación y cortados en rodajas para mejores resultados. La uvilla no puede ser colocada en trozos, por lo que se la apila entera con un factor de carga.

Para el cálculo del número de bandejas tomaremos a la carga de uvillas como base, debido a su bajo factor de carga, que a su vez nos demandara una mayor área de secado.

Primero se necesita determinar el área de superficie por kilogramo de materia seca.

$$A_{ms} := A_s \cdot \frac{(1 + X_{do})}{V_u \cdot \rho_u} \quad (6.3)$$

En donde:

A_{ms} : Área de superficie por Kg. de materia seca. / [$m^2/Kg_{materia\ seca}$]

A_s : Área superficial promedio. / [cm^2]

X_{do} : Humedad del producto en base seca. / [Kg_{agua}/Kg_{seco}]

V_u : Volumen promedio del producto. / [m^3]

ρ_u : Densidad del producto. / [Kg/m^3]

Por lo que tenemos que:

$$A_{ms} = 0.256 \frac{\text{m}^2}{\text{kg}}$$

Ahora se determina el área de superficie de secado, mediante la ecuación:

$$A_{\text{sec}} := A_{ms} \cdot \frac{C_d}{F_{c_u}} \quad (6.4)$$

En donde:

A_{sec} : Área de superficie de secado. / [m²]

C_d : Carga de producto final deshidratado. / [Kg]

F_{c_u} : Factor de carga para la uvilla.

Por lo que tenemos que el área de secado es:

$$A_{\text{sec}} = 2.137 \text{ m}^2$$

El área de nuestra bandejas esta determinada por las dimensiones antes señalada. $A_{\text{band}} = 1\text{m} \times 0.55\text{m} = 0.55\text{m}^2$. Con lo que ahora podemos determinar el número de bandejas (n_{band}) necesarias para nuestra carga.

$$n_{\text{band}} := \frac{A_{\text{sec}}}{A_{\text{band}}} \quad (6.5)$$

Dado que nos da 3.88 se aproxima a 4 bandejas, con lo que cada una soportara un peso de 13.75Kg de producto fresco al inicio de la deshidratación y será de fácil manejo para el operario.

Para incrementar el área de secado, las bandejas son perforadas en la parte inferior con agujeros de 1/8" de diámetro de manera intercalada como se muestra en la fig. 6.2. Dándonos un área total de secado mediante la siguiente expresión:

$$A_{\text{Tsec}} = 2n_{\text{band}}A_{\text{band}} \quad (6.6)$$

En donde;

A_{Tsec} : Área total de secado. / [m²]

n_{band} : Numero de bandejas.

A_{band} : Área de carga por bandeja. / [m²]

Reemplazan los respectivos valores y tenemos que:

$$A_{Tsec}=4.4m^2.$$

Las bandejas son construidas con un material inerte que no contamine al producto, que no reaccione con humedad generada en el proceso y que no se deforme con el peso de la carga. Dadas estas consideraciones, el material mas apropiado es el acero inoxidable AISI 304 con un espesor de 0.7mm.

Las perforaciones son de 1/8” para evitar que los productos más pequeños al terminar el proceso de deshidratación, que en nuestro caso es la uvilla, se puedan caer a la bandeja inferior. Aunque para mejores resultados se han colocado mallas de acero inoxidable sobre cada bandeja para no tener ningún tipo de residuo de humedad bajo el producto.

La separación mínima recomendada entre las bandejas³⁶ debe ser de (38mm).

La estructura soporte también es construida con perfiles L de acero inoxidable AISI 304 de 15mm, para garantizar que no exista ningún tipo de contaminación dentro de la cámara de secado.

³⁶ Perry, Robert, Manual del Ing. Quimico. 5ta Ed.

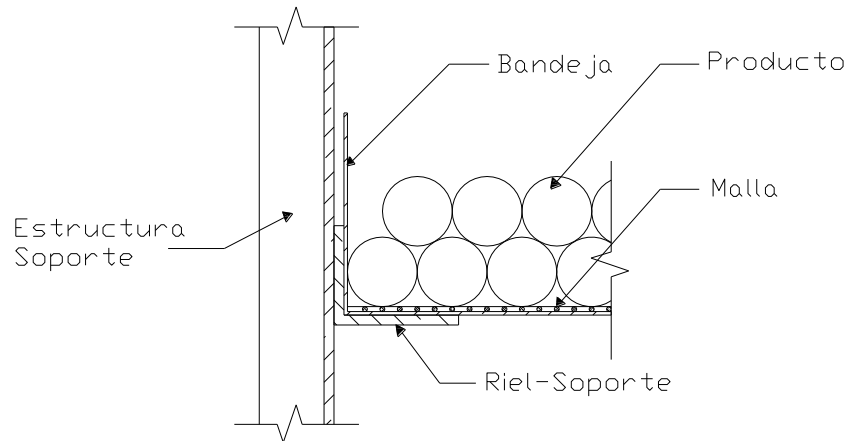


Figura 6.3. Estructura de las Bandejas de acero inoxidable.

Una vez realizados todos estos cálculos ya podemos diseñar nuestra cámara de secado, la misma que tendrá una geometría poliédrica de ocho lados y será construida con acero inoxidable AISI 480 de 1mm de espesor para evitar todo tipo de contaminación de los productos a deshidratar y recubierta por 4cm de lana de vidrio para reducir las pérdidas de calor con el ambiente y finalmente forrada con acero galvanizado de 1/32” de espesor en el exterior.

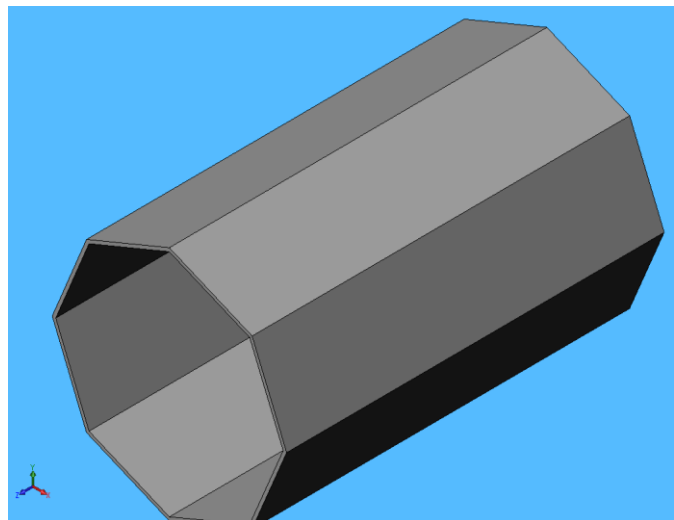


Figura 6.4. Cámara de secado

Tabla 6.9. Dimensiones del horno deshidratador.

	En el interior	En el exterior
Largo	1180mm	1220mm
Diámetro máx.	732mm	818mm
Ancho de pared	280mm	313mm
Volumen	0.44m ³	0.57m ³

El posicionamiento de las bandejas dentro del horno se lo puede observar en la siguiente figura, que además muestra la inclinación de las mismas que es de 10° para permitir la fácil evacuación de humedad. También están escalonadas con 3cm una de otra de manera ascendente para evitar que se contamine la bandeja inferior.

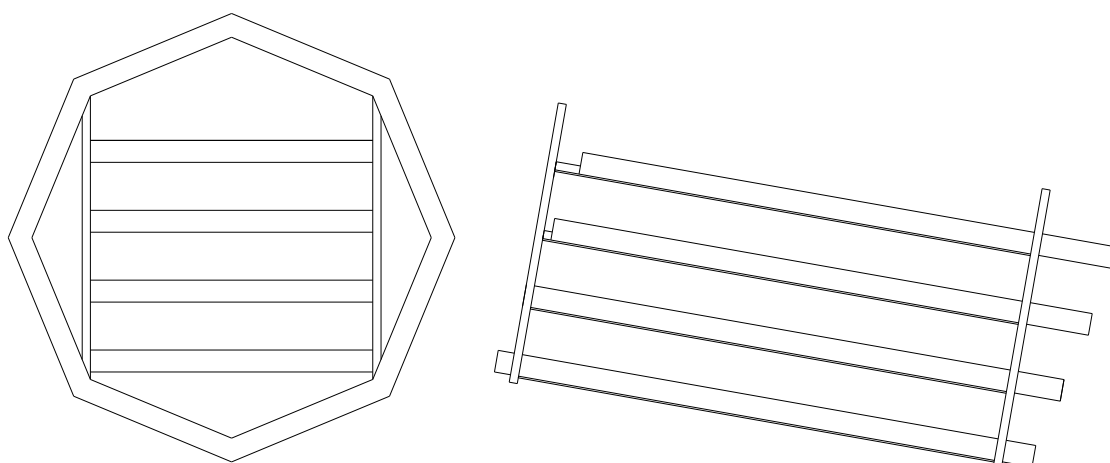


Figura 6.5. Vista frontal y longitudinal de las bandejas en el horno

6.2.1.2 Puerta

La puerta permite el ingreso y salida de las bandejas del interior de la cámara de secado por lo que también está construida con un material anticorrosivo, que en este caso es acero inoxidable AISI 480 de 1mm de espesor tanto interior como exteriormente y con 3cm de lana de vidrio en el alma para disminuir pérdidas de calor.

Está colocada en la parte frontal del horno, por lo que también tiene una geometría de ocho lados y está sujeta por dos bisagras de acero inoxidable de 2”.

Debido a que el flujo de aire es perpendicular a la puerta, se ha colocado caucho térmico en los filos para no permitir posibles pérdidas de aire y un cierre de tipo Global usado en frigoríficos.

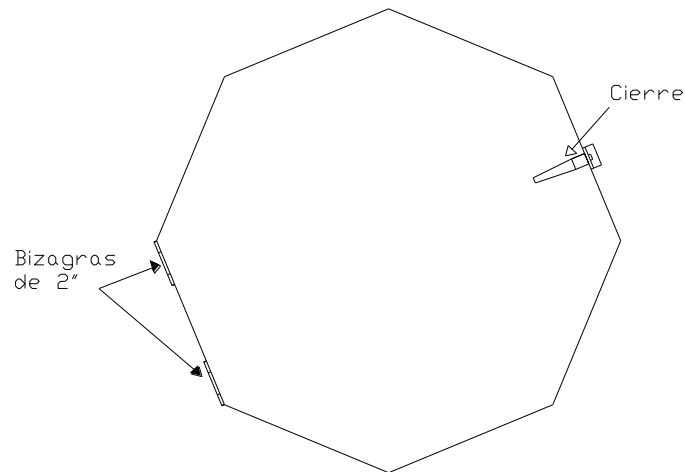


Figura 6.6. Vista frontal de la puerta del horno

6.2.1.3 Pérdidas de Calor

Cuando existe una diferencia de temperaturas o también llamado gradiente de temperatura en uno o varios cuerpos, se tiene una transferencia de calor o energía.

Un correcto aislamiento en la cámara permite conservar el calor que impida que bajen las temperaturas en las paredes internas a la del punto de rocío y que se produzca condensado en las mismas, que en una aplicación de deshidratación de productos no es favorable en sistemas convencionales; pero en nuestro caso el horno está diseñado tomando en cuenta este problema en el caso que se llegue a dar, debido a su geometría poliédrica e inclinada que evacua de una manera eficaz cualquier residuo de humedad.

A pesar que el diseño toma en cuenta el condensado, se ha utilizado 4cm de lana de vidrio como aislamiento entre una chapa de acero inoxidable en el interior y otra de acero galvanizado en el exterior, para una mejora en el ahorro energético.

La transferencia de calor se da desde el interior del horno hacia el ambiente, empezando por una convección forzada entre el aire de secado y las superficies

interiores de la cámara, luego por conducción a través de las paredes y finalmente por convección natural entre las paredes exteriores del horno y el ambiente.

Debido a éste análisis, con sistemas compuestos suele ser conveniente trabajar con un *coeficiente global de transferencia de calor*, h , que se define con una expresión análoga a la ley de enfriamiento de Newton³⁷ según la ecuación 5.9.

Por consiguiente el primer paso a seguir es determinar el coeficiente global de transferencia de calor, el mismo que se obtiene al sumar las resistencias por convección y conducción por los materiales utilizados y los flujos de aire tanto interno como externo.

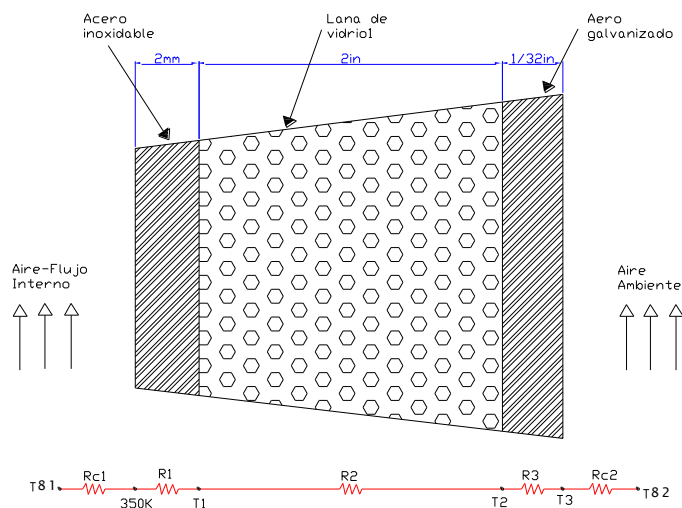


Figura 6.7. Circuito térmico equivalente para una pared compuesta en serie.

Nuestra cámara de secado está compuesta por acero inoxidable en el interior, aislada con lana de vidrio y cubierta con acero galvanizado en el exterior, por lo que la resistencia térmica total viene dada por:

$$R_{Tot} = \frac{1}{UA} = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_{int}} + \frac{e_1}{k_1} + \frac{e_2}{k_2} + \frac{e_3}{k_3} + \frac{1}{h_{ext}} \right) A} \quad (6.7)$$

³⁷ FRANK P. INCROPERA, Fundamentos de transferencia de calor. Cap. 3

Donde;

R_{Tot} : Resistencia térmica total. / [K/W]

h : Coeficiente de transferencia de calor por convección. / [W/m^2K]

k : Conductividad térmica. / [W/mK]

e : Espesor del material. / [m]³⁸

Para el caso de la conducción debemos conocer algunos datos importantes para poder aplicar la ecuación (6.7), los mismos que son:

Tabla 6.10. Propiedades de los materiales utilizados en la cámara.

Paredes	Material	Conductividad térmica [W/mK]	Espesor [mm]
Interior	AISI 480	17.3	1
Aislamiento	Lana de vidrio	5.08×10^{-4}	40
Exterior	latón	70	0.794
Tapa posterior			
Interior	AISI 480	17.3	2
Aislamiento	Lana de vidrio	5.08×10^{-4}	40
Exterior	latón	70	0.794
Puerta			
Interior	AISI 480	17.3	1
Aislamiento	Lana de vidrio	5.08×10^{-4}	30
Exterior	AISI 480	17.3	2

En el caso del cálculo del coeficiente de transferencia de calor por convección en el interior de la cámara de secado y de las paredes del horno con el ambiente, es necesario conocer las propiedades del fluido:

Tabla 6.11. Propiedades del flujo de aire.

Propiedad	Flujo Interno	Flujo Externo	Símbolo	Unidades
Temperatura	353	289	T	K

³⁸ FRANK P. INCROPERA, Fundamentos de transferencia de calor. Cap. 3

Velocidad de flujo	1.8	0.2	w	m/s
Viscosidad cinemática	21.25×10^{-6}	14.911×10^{-6}	v	m^2/s
Conductividad térmica	0.03023	0.02542	k	W/m^2K
Número de Prandtl	0.6994	0.7099	Pr	
Coefficiente volumétrico de expansión térmica	2.833×10^{-3}	3.46×10^{-3}	β	1/K

Dadas estas propiedades del fluido, que en este caso es aire, lo primero que se debe determinar es si el flujo es laminar o turbulento; para lo que se calcula el número de Reynolds, basados en la ecuación 5.11.

Una vez determinado que el flujo es laminar, se determina si la convección dentro de la cámara es libre, forzada o combinada, mediante las relaciones de Grashoff (Gr) y Reynolds (Re). El valor del Número de Grashoff se lo calcula mediante la ecuación 5.12.

En el caso de la mayor temperatura de trabajo que es de 353K, la temperatura de la pared interior es de 350K y de la pared exterior de 290.5K.

Aunque el valor obtenido en nuestro caso no se aproxima a 1, se analizará como una convección libre y forzada combinada, debido a la geometría de nuestro horno y el estudio del comportamiento térmico de la forma poliédrica.

Bajo esta consideración se determina el número de Nusselt sumando un Nusselt para flujo laminar sobre una placa plana en convección forzada (Nu_F) utilizando la ecuación 5.17, con otro obtenido para convección libre o natural de pared inclinada en cavidad interna, llamada ecuación de Hollands (Nu_N). Calculado con la ecuación 5.15.

$$Nu = Nu_F \pm Nu_N^{39} \quad (6.8)$$

El ángulo de las paredes será de 80° y de 10° para la puerta. Con respecto al flujo.

³⁹ FRANK P. INCROPERA, Fundamentos de transferencia de calor. Cap.9.

Una vez obtenido un Nusselt resultante, estamos en la capacidad de determinar el coeficiente de transferencia de calor por convección mediante la ecuación (5.10).

Para el cálculo de las pérdidas por convección libre de una pared inclinada en la parte exterior del horno, primeramente obtenemos el número de Nusselt basándonos en la expresión 5.13.

Hay que tomar en cuenta que en este caso el número de Rayleigh viene dado por una variación de la ecuación 5.16, por el ángulo de inclinación de la pared; de la siguiente forma:

$$Ra = Gr \times \cos(\theta_p) \times Pr \quad (6.9)$$

Finalmente se puede establecer la tasa de transferencia de calor por convección libre con el ambiente, utilizando la ecuación 5.10.

El horno deshidratador consta de 8 paredes planas con una inclinación de 10°, una tapa posterior y una puerta inclinada 80° respecto al flujo. Por lo que se debe realizar un cálculo de las pérdidas de calor por conducción, convección natural y forzada, por separado.

La radiación no se tomará en cuenta para el análisis de las pérdidas, debido a que las paredes de la cámara de secado se las consideran frías; es decir que el calor aportado al producto proviene de un flujo de aire caliente que siempre estará a una temperatura mayor a dichas paredes. Y la radiación de las paredes al producto será nula, debido a que el medio siempre estará mas caliente que las paredes.

Tabla 6.12. Resistencias Térmicas.

	Área [m ²]	Rc _{int} [K/W]	R ₁ [K/W]	R ₂ [K/W]	R ₃ [K/W]	Rc _{ext} [K/W]
Paredes	0.35x8	0.071	2.15x10 ⁻⁵	27.65	3.77x10 ⁻⁶	0.360

Tapa posterior	0.34	3.247	3.39×10^{-4}	231.11	3.23×10^{-5}	1.095
Puerta	0.38	3.247	1.53×10^{-4}	156.02	3.05×10^{-4}	1.095

Una vez analizado cada caso se calcula una resistencia total (R_{Tot}); dada por la ecuación (6.7), y se determina la pérdida total de calor (Q_P) de la pared, que viene dada por:

$$Q_P = \left(\frac{T_{int} - T_{ext}}{R_{Tot}} \right) \quad (6.10)$$

Desarrollo de Cálculos (MathCAD):

$$k_{\text{ac.inox.}} := 17.3 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$$

$$k_{\text{lan.vid.}} := 5.08 \cdot 10^{-4} \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$$

$$k_{\text{latón}} := 70 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$$

$$e_{\text{ac.inox.}} := 1 \text{ mm}$$

$$e_{\text{lan.vid.}} := 4 \text{ cm}$$

$$e_{\text{latón}} := \frac{1}{32} \text{ in}$$

$$l_1 := 1.2 \text{ m}$$

$$a_1 := 0.28 \text{ m}$$

$$a_2 := 0.2966 \text{ m}$$

$$a_3 := 0.3131 \text{ m}$$

$$A_1 := l_1 \cdot a_1$$

$$A_1 = 0.336 \text{ m}^2$$

$$A_2 := l_1 \cdot a_2$$

$$A_2 = 0.356 \text{ m}^2$$

$$A_3 := l_1 \cdot a_3$$

$$A_3 = 0.376 \text{ m}^2$$

Por conducción

$$R_1 := \frac{e_{\text{ac.inox.}}}{k_{\text{ac.inox.}} \cdot 8A_1}$$

$$R_1 = 2.15 \times 10^{-5} \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

$$R_2 := \frac{e_{\text{lan.vid.}}}{k_{\text{lan.vid.}} \cdot 8A_2}$$

$$R_2 = 27.654 \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

$$R_3 := \frac{e_{\text{latón}}}{k_{\text{latón}} \cdot 8A_3}$$

$$R_3 = 3.773 \times 10^{-6} \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

Por convección forzada pared plana horizontal:

$$Nu := 0.664 \cdot Re_1^{\frac{1}{2}} \cdot Pr_1^{\frac{1}{3}}$$

$$Nu = 187.913$$

Por Convección libre pared inclinada en cavidad interna (Hollands):

$$Ra_1 := Gr_{int} \cdot Pr_1$$

$$Ra_1 = 2.231 \times 10^8$$

$$Nu_1 := 1 + 1.44 \left[1 - \frac{1708 \cdot (\sin(1.8 \cdot \theta_p))^{1.6}}{Ra_1 \cdot \cos(\theta_p)} \right] \cdot \left(1 - \frac{1708}{Ra_1 \cdot \cos(\theta_p)} \right) + \left[\left(\frac{Ra_1 \cdot \cos(\theta_p)}{5830} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right]$$

$$Nu_1 = 20.242$$

Por combinación de convecciones:

$$Nu_p := Nu + Nu_1$$

$$Nu_p = 208.155$$

$$h_1 := \frac{Nu_p \cdot k_1}{l_1}$$

$$h_1 = 5.244 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

$$R_{C_{int}} := \frac{1}{h_1 8A_1}$$

$$R_{C_{int}} = 0.071 \frac{K}{W}$$

Por convección en el exterior:

$$Re_2 := \frac{w_{v,ext} \cdot l_1}{\nu_2}$$

$$Re_2 = 1.61 \times 10^4$$

$$Re_2 < 5 \cdot 10^5 \quad \text{flujo laminar}$$

$$\beta_{airext} := \frac{1}{T_{ext}}$$

$$\beta_{airext} = 3.46 \times 10^{-3} \frac{1}{K}$$

$$\alpha_{airext} := 21.048 \cdot 10^{-6} \frac{m^2}{s}$$

$$T_{pext} := 290.5K$$

$$Gr_{ext} := \frac{g \cdot \beta_{airext} \cdot (T_{pext} - T_{ext}) \cdot l_1^3}{\nu_2^2}$$

$$Gr_{ext} = 3.956 \times 10^8$$

$$\frac{Gr_{ext}}{Re_2^2} = 1.527 > 1 \quad \text{entonces la convección es libre}$$

Por Convección libre pared inclinada:

$$Ra_2 := Gr_{ext} \cdot \cos(\theta_p) \cdot Pr_2$$

$$Ra_2 = 4.878 \times 10^7$$

$$Nu_{ext} := 0.68 + \frac{0.67 \cdot Ra_2^{\frac{1}{4}}}{\left[1 + \left(\frac{0.492}{Pr_2} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{4}{9}}}$$

$$Nu_{ext} = 43.656$$

$$h_2 := \frac{Nu_{ext} \cdot k_2}{l_1}$$

$$h_2 = 0.925 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

$$R_{c_{ext}} := \frac{1}{h_2 \cdot 8A_3}$$

$$R_{c_{ext}} = 0.36 \frac{K}{W}$$

$$R_{eq} := R_1 + R_2 + R_3 + R_{c_{int}} + R_{c_{ext}}$$

$$R_{eq} = 28.084 \frac{K}{W}$$

$$Q_{p_{paredes}} := \frac{T_{int} - T_{ext}}{R_{eq}}$$

$$Q_{p_{paredes}} = 2.279W$$

Cálculo del calor perdido por conducción y convección a través de la tapa posterior del horno

Por Conducción:

$$A_{tapa} := .3407m^2$$

$$e_{ac.inox2} := 2mm$$

$$R_{1tapa} := \frac{e_{ac.inox2}}{k_{ac.inox} \cdot A_{tapa}}$$

$$R_{1tapa} = 3.393 \times 10^{-4} \frac{K}{W}$$

$$R_{2tapa} := \frac{e_{lan.vid.}}{k_{lan.vid.} \cdot A_{tapa}}$$

$$R_{2tapa} = 231.113 \frac{K}{W}$$

$$R_{3tapa} := \frac{e_{latón}}{k_{latón} \cdot A_{tapa}}$$

$$R_{3tapa} = 3.328 \times 10^{-5} \frac{K}{W}$$

Por Convección libre pared inclinada (Hollands):

$$L_{\text{tapa}} := 0.73\text{m}$$

$$Ra_{\text{tapa}} := \frac{g \cdot \beta_{\text{aire}} \cdot (T_{\text{int}} - T_p) \cdot L_{\text{tapa}}^3}{\nu_1 \cdot \alpha_{\text{aire}}}$$

$$Ra_{\text{tapa}} = 5.018 \times 10^7$$

$$\theta_{\text{tapa}} := 0.1745\text{rad}$$

$$Nu_{\text{tapai}} := 1 + 1.44 \left[1 - \frac{1708 \cdot (\sin(1.8 \cdot \theta_{\text{tapa}}))^{1.6}}{Ra_{\text{tapa}} \cdot \cos(\theta_{\text{tapa}})} \right] \cdot \left(1 - \frac{1708}{Ra_{\text{tapa}} \cdot \cos(\theta_{\text{tapa}})} \right) + \left[\left(\frac{Ra_{\text{tapa}} \cdot \cos(\theta_{\text{tapa}})}{5830} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right]$$

$$Nu_{\text{tapai}} = 21.83$$

$$h_{\text{tapai}} := \frac{Nu_{\text{tapai}} \cdot k_1}{L_{\text{tapa}}}$$

$$h_{\text{tapai}} = 0.904 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

$$Rc_{1\text{tapa}} := \frac{1}{h_{\text{tapai}} \cdot A_{\text{tapa}}}$$

$$Rc_{1\text{tapa}} = 3.247 \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

Por convección en el exterior:

$$L_{\text{tapae}} := 0.818\text{m}$$

$$Re_{\text{tapa}} := \frac{w_{v,\text{ext}} \cdot L_{\text{tapae}}}{\nu_2}$$

$$Re_{\text{tapa}} = 1.097 \times 10^4$$

$$Re_{\text{tapa}} < 5 \cdot 10^5 \quad \text{flujo laminar}$$

$$Nu_{\text{tapae}} := 0.664 \cdot Re_{\text{tapa}}^{\frac{1}{2}} \cdot Pr_2^{\frac{1}{3}}$$

$$Nu_{\text{tapae}} = 62.045$$

$$h_{\text{tapae}} := \frac{Nu_{\text{tapae}} \cdot k_2}{L_{\text{tapae}}}$$

$$h_{\text{tapae}} = 1.928 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

$$A_{\text{tapae}} := .4735\text{m}^2$$

$$Rc_{2\text{tapa}} := \frac{1}{h_{\text{tapae}} \cdot A_{\text{tapae}}}$$

$$Rc_{2\text{tapa}} = 1.095 \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

$$R_{\text{eqtapa}} := R_{1\text{tapa}} + R_{2\text{tapa}} + R_{3\text{tapa}} + Rc_{1\text{tapa}} + Rc_{2\text{tapa}}$$

$$R_{\text{eqtapa}} = 235.455 \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

$$Q_{p\text{tapa}} := \frac{T_{\text{int}} - T_{\text{ext}}}{R_{\text{eqtapa}}}$$

$$Q_{p\text{tapa}} = 0.272\text{W}$$

Cálculo del calor perdido por conducción y convección a través de la puerta del horno

Por conducción:

$$A_{\text{puertai}} := 0.3785 \text{ m}^2$$

$$R_{1\text{puerta}} := \frac{e_{\text{ac.inox}}}{k_{\text{ac.inox}} \cdot A_{\text{puertai}}}$$

$$R_{1\text{puerta}} = 1.527 \times 10^{-4} \frac{\text{s}^3 \text{K}}{\text{kgm}^2}$$

$$e_{\text{lan.vid.2}} := 3 \text{ cm}$$

$$R_{2\text{puerta}} := \frac{e_{\text{lan.vid.2}}}{k_{\text{lan.vid.}} \cdot A_{\text{puertai}}}$$

$$R_{2\text{puerta}} = 156.024 \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

$$R_{3\text{puerta}} := \frac{e_{\text{ac.inox2}}}{k_{\text{ac.inox}} \cdot A_{\text{puertai}}}$$

$$R_{3\text{puerta}} = 3.054 \times 10^{-4} \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

Por Convección libre pared inclinada (Hollands):

$$T_{\text{puerta}} := 350 \text{ K}$$

$$Ra_{\text{puerta}} := \frac{g \cdot \beta_{\text{aire}} \cdot (T_{\text{int}} - T_{\text{puerta}}) \cdot L_{\text{tapa}}^3}{\nu_1 \cdot \alpha_{\text{aire}}}$$

$$Ra_{\text{puerta}} = 5.018 \times 10^7$$

$$Nu_{\text{puertai}} := 1 + 1.44 \cdot \left[1 - \frac{1708 \cdot (\sin(1.8 \cdot \theta_{\text{tapa}}))^{1.6}}{Ra_{\text{puerta}} \cdot \cos(\theta_{\text{tapa}})} \right] \cdot \left(1 - \frac{1708}{Ra_{\text{puerta}} \cdot \cos(\theta_{\text{tapa}})} \right) + \left[\left(\frac{Ra_{\text{puerta}} \cdot \cos(\theta_{\text{tapa}})}{5830} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right]$$

$$Nu_{\text{puertai}} = 21.83$$

$$h_{\text{puertai}} := \frac{Nu_{\text{puertai}} \cdot k_1}{L_{\text{tapa}}}$$

$$h_{\text{puertai}} = 0.904 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$$

$$R_{C1\text{puerta}} := \frac{1}{h_{\text{puertai}} \cdot A_{\text{tapa}}}$$

$$R_{C1\text{puerta}} = 3.247 \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

Por convección en el exterior:

$$Re_{\text{puerta}} := \frac{w_{\text{v.ext}} \cdot L_{\text{tapae}}}{\nu_2}$$

$$Re_{\text{puerta}} = 1.097 \times 10^4$$

$$Re_{\text{puerta}} < 5 \cdot 10^5 \quad \text{flujo laminar}$$

$$Nu_{puertae} := 0.664 \cdot Re_{puerta}^{\frac{1}{2}} \cdot Pr_2^{\frac{1}{3}}$$

$$Nu_{puertae} = 62.045$$

$$h_{puertae} := \frac{Nu_{puertae} \cdot k_2}{L_{tapae}}$$

$$h_{puertae} = 1.928 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

$$R_{c2puerta} := \frac{1}{h_{puertae} A_{tapae}}$$

$$R_{c2puerta} = 1.095 \frac{K}{W}$$

$$R_{eqpuerta} := R_{1puerta} + R_{2puerta} + R_{3puerta} + R_{c1puerta} + R_{c2puerta}$$

$$R_{eqpuerta} = 160.367 \frac{K}{W}$$

$$Q_{ppuerta} := \frac{T_{int} - T_{ext}}{R_{eqpuerta}}$$

$$Q_{ppuerta} = 0.399W$$

$$Q_{pT} := Q_{pparedes} + Q_{ptapa} + Q_{ppuerta}$$

$$Q_{pT} = 2.95W$$

Tabla 6.13. Calor Perdido.

	R_{Tot} [K/W]	Q_P [W]
Paredes	28.08	2.279
Tapa posterior	235.4	0.272
Puerta	160.3	0.399
Total =		2.950

La pérdida total de calor en el sistema es de aproximadamente 3W, valor que debemos agregar al que se necesita suministrar para la deshidratación de cada una de las frutas.

6.2.2 DISEÑO DEL SISTEMA DE CALEFACCIÓN

El análisis en el interior de la cámara de secado nos ayudara a determinar condiciones en el proceso de secado, especialmente el tiempo del ciclo.

La transferencia de calor a las frutas se da mediante flujo de aire caliente, mediante el uso de la ecuación⁴⁰:

$$q_a = \alpha(T - T_s) \quad (6.11)$$

En donde;

q_a : Calor trasferido al producto. / [W]

α : Tasa de transferencia de calor. / [W/m²K]

T: Temperatura de bulbo seco. / [K]

T_s : Temperatura del producto. / [K]

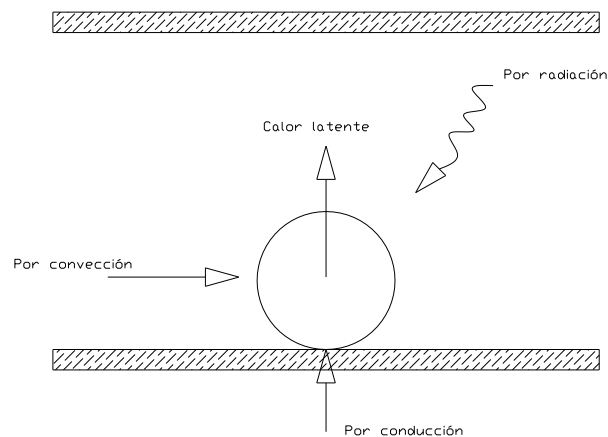


Figura 6.8. Calor suministrado al producto.

Dado que más del 90% del calor que recibe el producto se da por convección, determinamos la tasa de transferencia de calor bajo este parámetro.

Para lo cual se necesita conocer las propiedades del aire a la temperatura de trabajo para el secado de cada producto.

⁴⁰ Enciclopedia de Química Industrial de Ullman. Cáp. 4.

Tabla 6.14. Propiedades del aire a diferentes temperaturas de trabajo.

	Uvilla	Manzana	Durazno	Símbolo
Temp. Bulbo seco [K]	327	350	353	T
Temp. Bulbo húmedo [K]	318	333	333	T _{bh}
Velocidad de flujo [m/s]	1.8	1.8	1.8	w
Número de Prandtl	0.70322	0.70	0.6994	Pr
Viscosidad cinemática [m ² /s]	18.606x10 ⁻⁶	20.92x10 ⁻⁶	21.25x10 ⁻⁶	ν
Conductividad térmica [w/m ² K]	0.0283	0.03	0.03023	k
Viscosidad dinámica [Ns/m ²]	19.734x10 ⁻⁶	20.82x10 ⁻⁶	20.951x10 ⁻⁶	μ

Tabla 6.15. Viscosidad dinámica del agua a temp. de bulbo húmedo.

	Uvilla	Manzana	Durazno
Viscosidad dinámica del agua (μ _a)[Ns/m ²]	9.81x10 ⁻⁶	10.41x10 ⁻⁶	10.41x10 ⁻⁶

El siguiente parámetro a determinar es el número de Reynolds, dado por:

$$Re = \frac{wD}{\nu} \quad (6.12)$$

donde D, es el diámetro de la fruta en [m].

Conocido Reynolds, se debe calcular el número de Nusselt para cada producto, utilizando la ecuación:

$$\text{Nu}_e := 2 + \left(0.4\text{Re}^{\frac{1}{2}} + 0.06\text{Re}^{\frac{2}{3}} \right) \cdot \text{Pr}^{0.4} \left(\frac{\mu}{\mu_a} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6.13)$$

Ahora ya es posible determinar el coeficiente de transferencia de calor por convección (h), para cada producto y la respectiva tasa de transferencia de calor requerida, utilizando la ecuación (6.11)

$$\alpha = h = \frac{\text{Nu}_e k}{D} \quad (6.14)$$

Para determinar el tiempo de secado en cada proceso, debemos calcular primeramente la velocidad de secado dada por la ecuación 5.37.

La entalpía de vaporización se la obtiene de la tabla de propiedades del agua entrando con la temperatura de bulbo húmedo, que aquí es equivalente a la temperatura superficial de cada producto.

El tiempo de secado en régimen constante, viene dado por la ecuación 5.45.

Para la Uvilla:

$$\rho_u := 790 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$M := 55\text{kg}$$

$$V_u := \frac{M}{\rho_u}$$

$$V_u = 0.07\text{m}^3$$

$$Cp_u := 3000 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

Cálculo del Calor necesario para el secado de la uvil

$$T_i := 289\text{K}$$

$$T_f := 327\text{K}$$

$$t := 28800\text{s}$$

$$Q_{\text{útil}} := M \cdot C_{p_u} \cdot \frac{(T_f - T_i)}{t}$$

$$Q_{\text{útil}} = 217.708\text{W}$$

Para la manzana:

$$\rho_m := 840 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$M := 55\text{kg}$$

$$k := 0.523 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

$$V_m := \frac{M}{\rho_m}$$

$$V_m = 0.065\text{m}^3$$

$$C_{p_m} := 3600 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

Cálculo del Calor necesario para el secado de la manza

$$T_i := 289\text{K}$$

$$T_f := 350\text{K}$$

$$t := 16200\text{s}$$

$$Q_{\text{útil}1} := M \cdot C_{p_m} \cdot \frac{(T_f - T_i)}{t}$$

$$Q_{\text{útil}1} = 745.556\text{W}$$

Para el durazno:

$$\rho_d := 890 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$M := 55\text{kg}$$

$$V_d := \frac{M}{\rho_d}$$

$$V_d = 0.062\text{m}^3$$

$$Cp_d := 3720 \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$$

Cálculo del Calor necesario para el secado del duraz

$$T_i := 289\text{K}$$

$$T_f := 353\text{K}$$

$$t := 4.5\text{h}$$

$$Q_{\text{útil}2} := M \cdot Cp_d \cdot \frac{(T_f - T_i)}{t}$$

$$Q_{\text{útil}2} = 3.036 \times 10^6 \text{ J}$$

Una vez realizado este análisis, se obtienen los siguientes valores:

Tabla 6.16. Valores de calor, velocidad y tiempo de secado.

	Unidades	Uvilla	Manzana	Durazno
Entalpía de vaporización	[KJ/Kg]	2394.8	2358.8	2358.8
Tasa de transferencia de calor	[W/m ² K]	58.995	32.179	44.498
Calor transferido al producto	[W/m ²]	530.957	547.036	889.966
Velocidad de secado	[Kg _{agua} /s]	9.76x10 ⁻⁴	1.02x10 ⁻³	1.66x10 ⁻³
Tiempo de secado	[h]	7.830	4.267	4.705

El calor utilizado para calentar el flujo de aire transferido al interior de la cámara en los procesos de secado fue suministrado por combustión de biomasa (cascarilla de

arroz), mediante el uso de un intercambiador de calor de flujo cruzado, existente en los Laboratorios de Maquinas y herramientas de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la ESPE.



Figura 6.9. Intercambiador de Calor.

Para determinar la capacidad de secado del horno nos basamos en la siguiente expresión:

$$\text{Cap}_{\text{SEC}} = \frac{\text{Vol}}{t} \quad (6.15)$$

donde;

Cap_{SEC}: Capacidad de secado del horno. / [m³/h]

Vol: Volumen de carga húmeda de producto / [m³]

t: Tiempo del proceso de secado / [h]

Obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 6.17. Capacidad de secado del horno.

	Volumen [m ³]	Tiempo [h]	Capacidad de secado [m ³ /h]
Uvilla	0.0263	7.830	0.00336
Manzana	0.00654	4.267	0.00153
Durazno	0.00662	4.705	0.00141

6.2.3 DISEÑO DEL SISTEMA DE VENTILACIÓN

Para obligar al aire a que circule por las bandejas dentro de la cámara de secado, se necesita generar una corriente o flujo producto de una diferencia de presión, la misma que se consigue con la utilización de un ventilador.

Un ventilador, es un elemento mecánico de desplazamiento negativo, en el sentido que es capaz de acumular la clase de presión que puede acumular un compresor.

Los ventiladores, pueden ser centrífugos o axiales y cuentan con varias curvas características, que muestran los valores de presión, potencia consumida y rendimiento en función del caudal de aire.

Los centrífugos o de jaula de ardilla, son capaces de acumular más presión diferencial entre su entrada y salida, se usan en aplicaciones donde se requieren pequeños caudales y altas presiones estáticas. Se clasifican por la forma de sus aletas o alabes. Por lo general tienen dos alabes curvados hacia delante y una barrera para frenar al aire que está girando alrededor del rodillo de ventilador.

Estos ventiladores son silenciosos, la transmisión puede ser a través de bandas o directa. Los que emplean transmisión directa, el eje del motor se encuentra conectado directamente a la rueda o aspa del ventilador, generalmente en ventiladores de tamaño o muy grandes. En los de transmisión por bandas o por correa, la rueda del ventilador se encuentra conectada mediante un sistema de bandas y poleas al eje del motor, empleando este método para ventiladores grandes.

Dentro de los ventiladores axiales, existen tres tipos básicos: Helicoidales, tubulares y tubulares con directrices.

Los ventiladores helicoidales se emplean para mover aire con poca pérdida de carga, y su aplicación más común es la ventilación general. Se construyen con dos tipos de alabes: alabes de disco para ventiladores sin ningún conducto; y alabes estrechas para ventiladores que deban vencer resistencias bajas (menos de 25 Mm. c d a). Sus prestaciones están muy influenciadas por la resistencia al flujo del aire y un pequeño incremento de la presión provoca una reducción importante del caudal.

Los ventiladores tubulares disponen de una hélice de alabes estrechos de sección constante o con perfil aerodinámico (ala portante) montada en una carcasa cilíndrica. Generalmente no disponen de ningún mecanismo para enderezar el flujo de aire. Los ventiladores tubulares pueden mover aire venciendo resistencias moderadas (menos de 50 Mm. cda).

Los ventiladores turboaxiales con directrices tienen una hélice de alabes con perfil aerodinámico (ala portante) montado en una carcasa cilíndrica que normalmente dispone de aletas enderezadoras del flujo de aire en el lado de impulsión de la hélice. En comparación con los otros tipos de ventiladores axiales, éstos tienen un rendimiento superior y pueden desarrollar presiones superiores (hasta 600 Mm. cda).

Las directrices (compuertas) tienen la misión de hacer desaparecer la rotación existente o adquirida por el fluido en la instalación, a la entrada del rodete o tras su paso por el mismo. Estas directrices pueden colocarse a la entrada o a la salida del rodete, incluso las hay fijas ó removibles.

El aire circula por un conducto gracias a la diferencia de presión que existe entre sus extremos.

Para diferencias de nivel de hasta 100 m, velocidades inferiores a 50 m/s (caso que puede considerarse al aire como incompresible) y régimen estacionario, las presiones obedecen al siguiente teorema:

VENTILADORES AXIALES, DESCRIPCIÓN Y CURVAS DE OPERACIÓN⁴¹.

Los ventiladores axiales están compuestos básicamente de un rotor de dos a 13 paletas, solidario a un eje propulsor movido por un motor que impulsa aire en una trayectoria recta, con salida de flujo helicoidal. Existen 3 tipos básicos de estos ventiladores que son:

TIPO PROPULSOR O DE PARED: Que es el típico ventilador para bodegas industriales, de baja presión estática (0,5 a 1,5 pulg. de columna de agua) con caudales variables según su diámetro.

TIPO TURBO – AXIAL: Es aquel que tiene su rotor y motor dentro de una carcasa cilíndrica, lo que incrementa su capacidad y presión estática hasta valores de 6 pulg. columna de agua, apropiado para ser conectados a ductos , campanas, torres de enfriamiento, y para operar en serie.

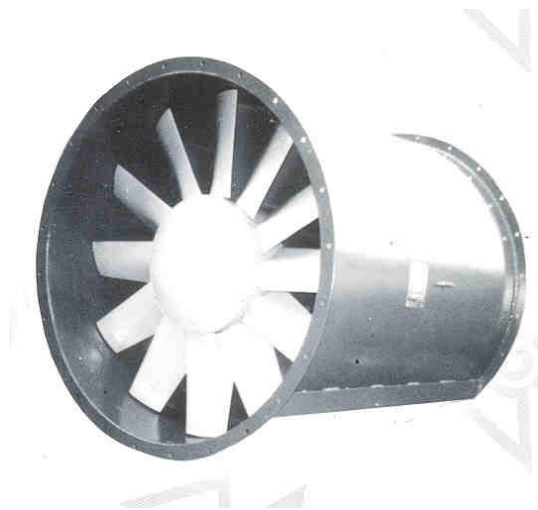


Figura 6.10. Ventilador Turbo-Axial.

TIPO VANE – AXIAL: Es similar al anterior, pero además posee un juego de paletas guías fijas a la carcasa (vanes, venas) que le permite obtener una más alta presión estática de trabajo (de 6 a 13 ó más pulgadas de agua en casos de diseños especiales).

⁴¹ <http://www.extractores.com.mx/index.htm>



Figura 6.11. Ventilador Vaneaxial.

Por sus altas presiones, los tipos vaneaxial, son los más utilizados en sistemas de ventilación auxiliar seguidos de los turboaxiales. El tipo propulsor sólo se utiliza en la ventilación de locales y dependencias subterráneas.

La curva característica de los ventiladores axiales se muestra en la Figura 6.11, donde se incluye los valores de presión estática, presión total, potencia requerida, eficiencia mecánica y presión de velocidad de la descarga.

Más abajo se han incluido curvas típicas de los tres tipos de ventiladores axiales, a modo de comparación.

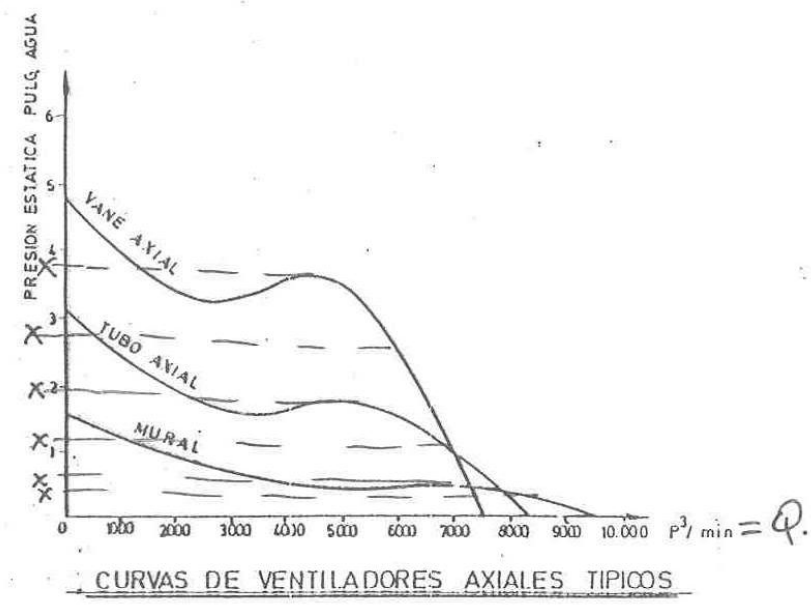
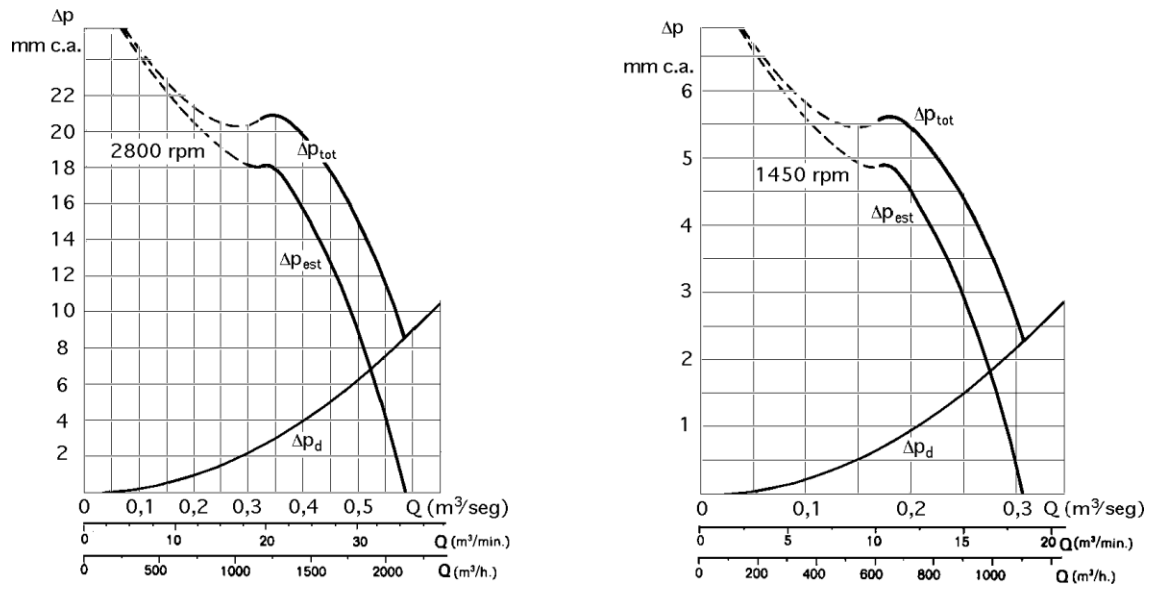


Figura 6.12. Curvas características de los ventiladores axiales.

Los ventiladores axiales (tipo turbo – axial) se proporcionan para operarlos en serie por algunos fabricantes como contra – rotatorios, es decir, con sentido de giro invertidos de dos o más etapas consecutivas, como se muestra en Figura 6.12.

De acuerdo con sus curvas de operación, este método proporciona valores de presión más altas que las conseguidas por ventiladores similares puestos en serie con el mismo sentido de rotación, con claras ventajas para el diseño de estaciones de ventiladores, apropiados para la atención de desarrollos de gran longitud, como puede

apreciarse en la Figura 6.12, curvas de operación de un modelo de ventilador contra – rotatorio de dos etapas.

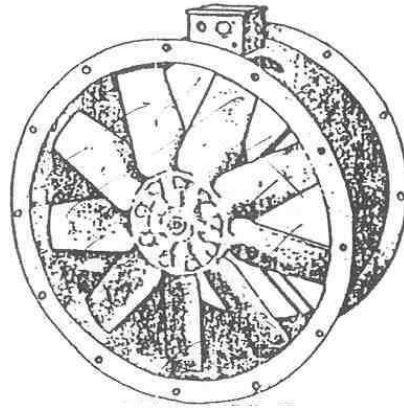
El número de etapas contra – rotatorias pueden ser 2, 3, 4, 5 o más y la presión estática así desarrollada será aproximadamente 3, 4, 6, 7 o más veces que la correspondiente a una etapa simple del mismo diámetro y velocidad.

Este sistema de instalación permite hacer la instalación completa para el total de la ductería a emplearse en el desarrollo, y luego comenzar a operar sólo con una etapa, dejando las demás rotando en vacío hasta que la longitud de la ductería precise el funcionamiento de la etapa siguiente y así sucesivamente hasta completar el funcionamiento de todas las etapas contra – rotatorias. El único límite a considerar con cuidadoso análisis es el valor práctico máximo que es conveniente alcanzar con estos ventiladores cuando se trabaja con ductería plástica, que es menos resistente a la presión que el metálico y de mayor generación de fugas de aire, directamente proporcionales a la presión estática de trabajo de la ductería.

Las ventajas de este tipo de instalación con ventiladores, cuyas unidades son idénticas y con fuerza motriz independiente son sus facilidades de montaje en serie, sin requerir ductería intermedia como acontece con los tipos vane – axial, su eficiencia en la generación de alta presión estática, su ajuste de ángulo de paletas que permite variar su capacidad y su economía en energía durante la puesta en marcha del sistema.

VENTILADORES CONTRAROTATORIOS

MODELO WOODS TIPO AEROFOIL TIPO "L"



FORMAS DE OPERACION

VENTILADOR WOODS DE 24"y30" TIPO "K"

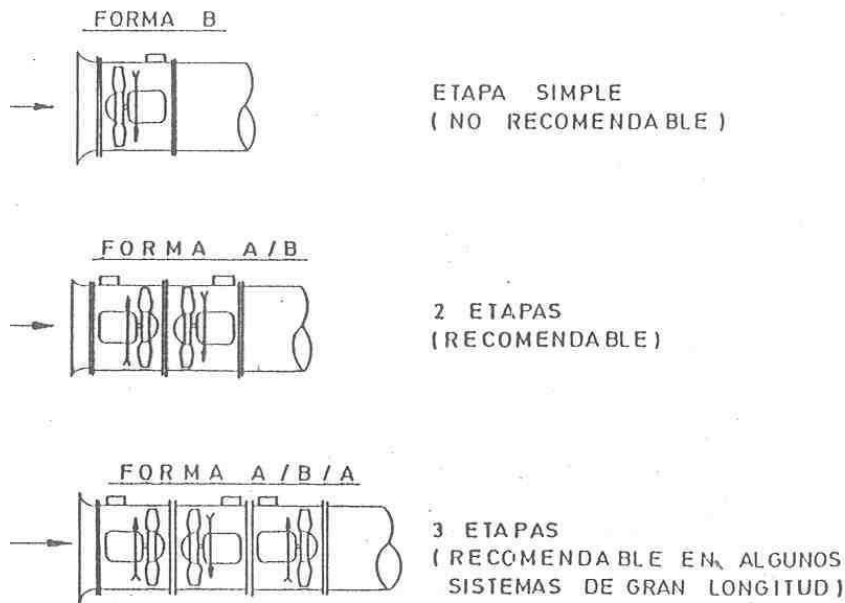


Figura 6.13. Ventiladores contrarrotatorios.

La velocidad a la cual un ventilador puede impulsar el aire depende de la presión que este tenga que superar para circular el flujo. En un ventilador cada volumen desplazado (CFM) corresponde a la resistencia específica llamada presión estática (SP) en el flujo del aire. La serie de puntos de volumen desplazado y presión estática, a un número de revoluciones por minuto constante, genera una curva única. Es decir que al variar las revoluciones por minuto se obtiene una familia de curvas de ventilador.

Para la selección de un ventilador, se debe conocer el caudal de aire la presión estática. Debido que los fabricantes presentan las curvas características del funcionamiento del ventilador a condiciones normales, es decir 20°C y 760 mmHg; es necesario corregir el dato de la presión estática cuando trabaja sobre el nivel del mar, para lo cual se divide la presión estática real para la relación de densidades.

El flujo de aire necesario a aplicar en el horno viene dado por:

$$Q_a = 60vA_1 \quad (6.16)$$

donde;

Q_a : Caudal de aire necesario. / [m³/min]

v : Velocidad del are. / [m/s]

A_1 : Área libre entre bandejas. / [m²]

Dado que el área entre bandejas en nuestro horno es de 0.247m² y la velocidad del aire debe estar entre (1.5 - 2)m/s, utilizaremos un ventilador axial de 800 CFM.

NORMAS DE MANTENIMIENTO⁴²

DISPOSITIVOS DE SEGURIDAD.- Un ventilador nunca debe operar a una velocidad más alta que aquella para la cual su fabricante lo diseñó. El rotor puede estar operando a su máxima velocidad de seguridad y puede fallar por los mayores esfuerzos que resultan de una velocidad más alta que puede estar cerca de la velocidad crítica de la flecha y causar una vibración excesiva; la fuerza motriz indicada para el ventilador puede aumentar lo suficiente como par sobrecargar y quemar la fuente motriz. El ventilador sigue unas leyes según las cuales el volumen de fluido desplazado es directamente proporcional al número de rpm, la presión desarrollada lo es al cuadrado de n y la potencia requerida al cubo de n.

⁴² Manual de Operaciones Industriales, Ing. Pedro Fernández. Cáp. 5.

Los dispositivos de seguridad deben proteger al personal del contacto con elementos rotatorios y, al mismo tiempo, interferir al mínimo en el funcionamiento normal del equipo; asimismo, deben proteger el equipo contra daños accidentales.

a) Protecciones metálicas

Las protecciones metálicas se utilizan para cubrir la entrada o salida del ventilador centrífugo o axial, o para rodear completamente al ventilador, al motor y a la transmisión del ventilador de hélice.

Estas protecciones metálicas (rejillas de malla o entrecalado fino), obstruyen la corriente de aire y reducen la capacidad del ventilador de manera considerable; si es posible, no se debe usar una malla plana de menos de 25 mm²; si se tiene que usar una malla fina, la protección metálica debe ser lo suficientemente grande como para que su área libre sea, por lo menos, igual al área de entrada o de salida, según el caso.

b) Guardabandas.

La transmisión por bandas en V es de fricción y, como tal, genera calor. El aire debe circular libremente por todas las partes de la transmisión, colaborando en la disipación de este calor, no siendo buena práctica el envolver completamente las transmisiones por bandas en V; si es posible conviene utilizar guardabandas de malla abierta.

LOS PROBLEMAS MÁS COMUNES DE LOS VENTILADORES Y SUS POSIBLES CAUSAS:

a) Capacidades y presión abajo de las nominales

- La resistencia total del sistema es más alta que la calculada.
- La velocidad es demasiado baja.
- Las compuertas y aspas radiales de entrada no ajustan adecuadamente.
- Condiciones insuficientes de entrada o salida.
- Filtraciones de aire en el sistema.
- Rotor dañado.
- Sentido incorrecto de rotación.
- Rotor montado al revés en la flecha.

b) Vibraciones y ruido

- Mal alineamiento del rotor o transmisión por bandas en V.
- Base de cimentación inestable.
- Materiales extraños sobre el rotor que causan desequilibrio.
- Rotor o motor dañados.
- Pernos o tornillos fijos, rotos o sueltos.
- Flecha vencida.
- Rotor o motor desequilibrados.
- Zumbido magnético de 120 ciclos debido a la entrada de energía eléctrica
- El ventilador entrega más de la capacidad nominal.
- Compuertas o aletas radiales de entrada flojas.
- Velocidad demasiado alta o el ventilador gira en dirección errónea.
- Vibración transmitida al ventilador desde otro punto o fuente.

c) Sobrecarga de la fuente motriz

- Velocidad demasiada alta.
- Descarga que sobrepasa la capacidad, debido a que la resistencia existente del sistema es más baja que la original nominal.
- Densidad del gas por encima del valor de diseño.
- Empaque demasiado apretado o defectuoso.
- Sentido de rotación erróneo.
- Flecha vencida.
- Mal alineamiento.
- El rotor pega o roza contra la envolvente.
- Bobinado del motor defectuoso.

6.2.4 DISEÑO DE LA ESTRUCTURA SOPORTE

La estructura soporte del horno deshidratador, está construida de tubo cuadrado estructural (1 ½"x1mm). Y tiene una forma capaz de soportar el horno manteniéndolo inclinado 10° y con un vértice en la parte inferior, como se muestra en la siguiente figura:

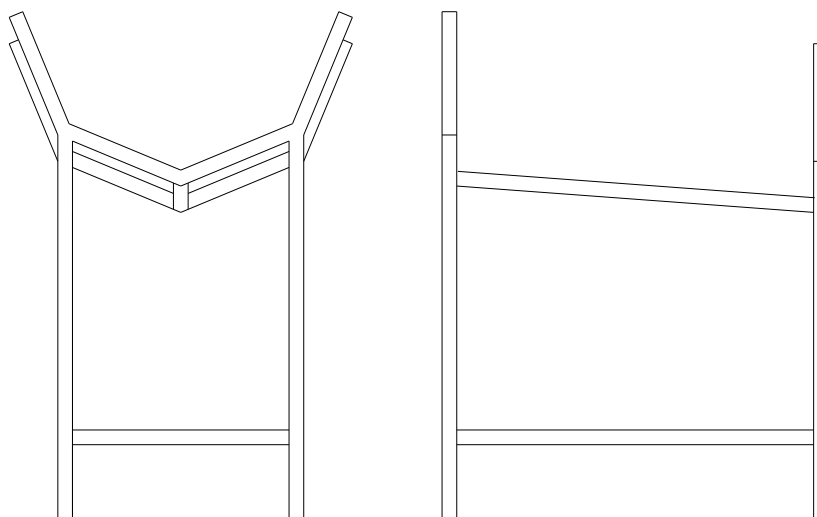


Figura 6.14. Estructura soporte.

Para evitar corrosión y fricción al mover el horno de un sitio a otro se colocaron regatones cuadrados de 1 ½”mm.

NOTA: El cálculo de la estructura con Solid Works se encuentra en el Anexo G.

6.3 DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL

En todo proceso industrial y semi industrial, es de suma importancia tener un control de los parámetros que influyen en los mismos. Con mayor razón en un proceso de deshidratación de productos comestibles, como en nuestro caso de frutas, ya que una falencia en este sentido, ocasionaría la obtención de productos de mala calidad y una pérdida económica y de tiempo considerable.

Dentro de la cámara de secado se necesitan controlar la temperatura del aire, la temperatura superficial del producto y la humedad relativa. Por lo que el sistema de control puede ser básico o completamente automatizado dependiendo del presupuesto disponible.

El control para la temperatura se realizó con el uso de una termocupla tipo J, ubicada en la parte interior central de cámara. El pirómetro empleado tiene con un rango máximo de 200°C y una apreciación de 1°C, que trabaja con 110 – 220V. El mismo

que corta el flujo de aire caliente en luz roja y posición “off” si se supera la temperatura fijada, y lo enciende en posición “on” y luz verde, automáticamente cuando la temperatura baja. Como se muestra a continuación:



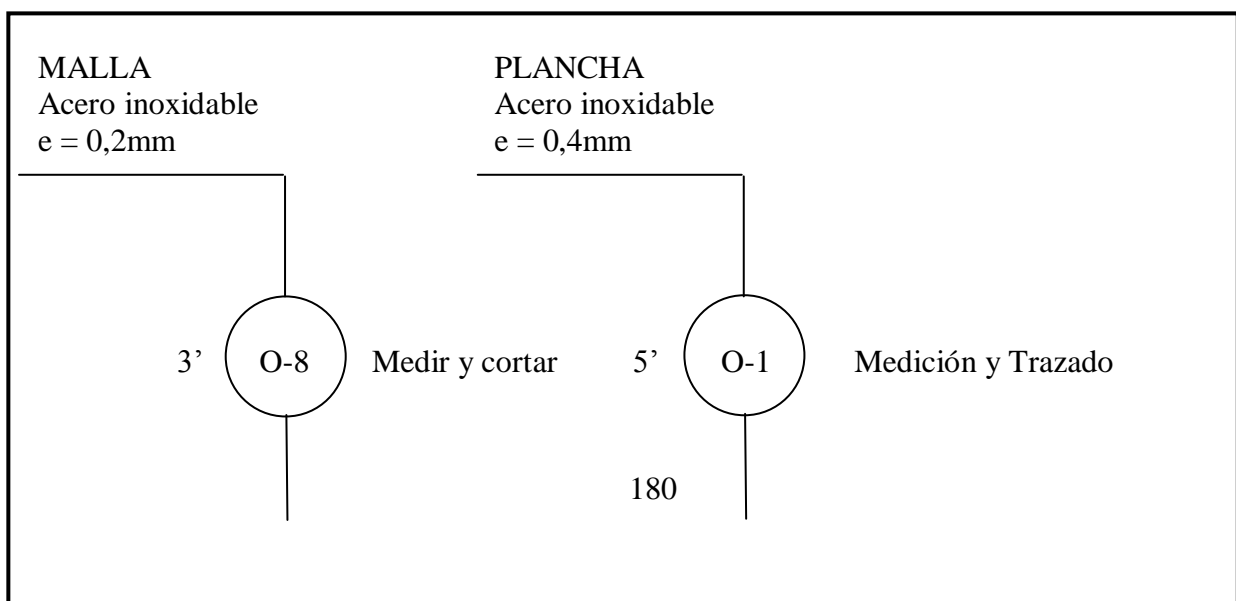
Figura 6.15. Control de temperatura interior de la cámara.

La lectura de la temperatura superficial y la humedad relativa en la cámara se la realiza manualmente, mediante un medidor láser. En el caso de la temperatura se debe calibrar la emisividad del producto. En nuestro caso para alimentos calientes.

La caja de control se ubica al lado derecho del horno. En el mismo que se encuentra el pirómetro y el accionamiento del ventilador.

6.4 DIAGRAMAS DE PROCESOS

DIAGRAMA DE PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DE LAS BANDEJAS



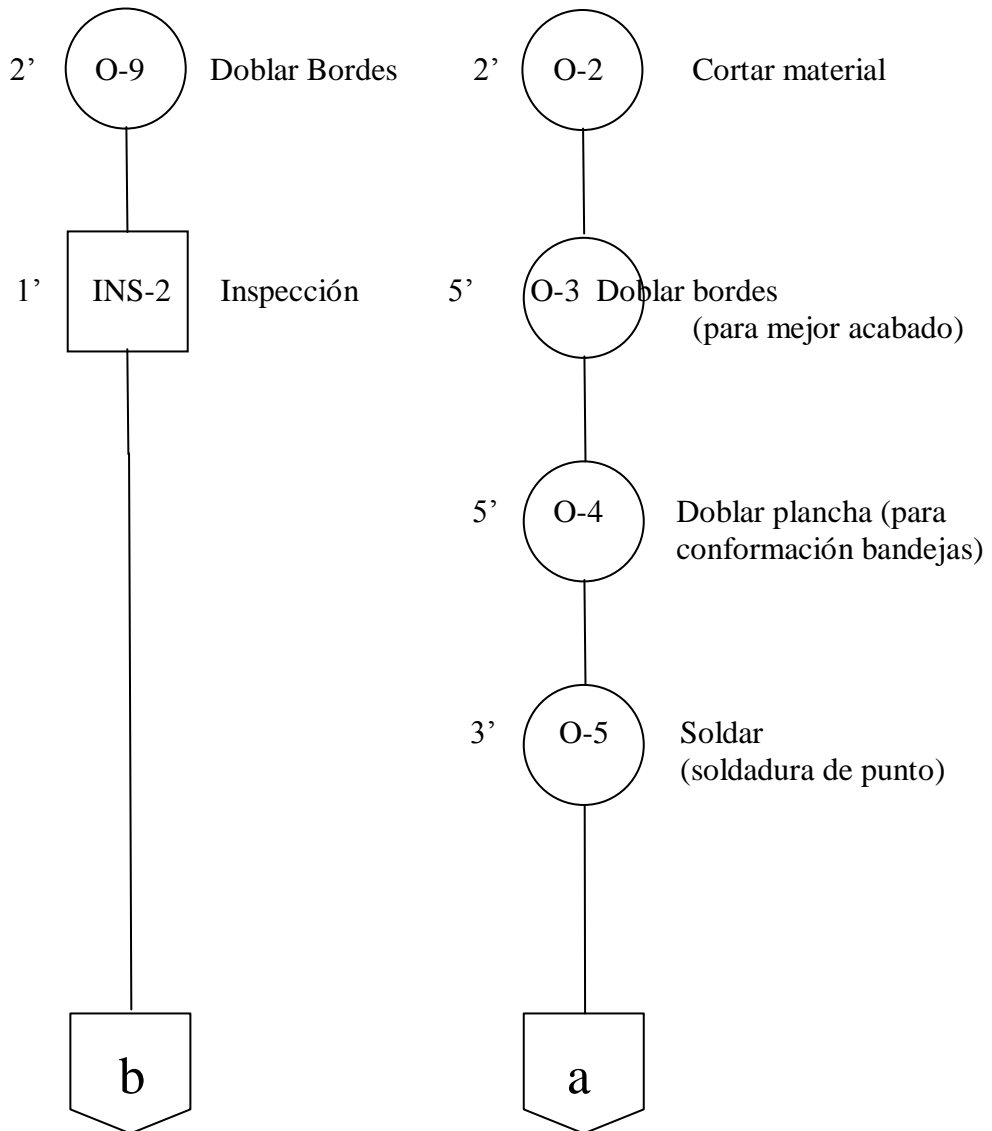
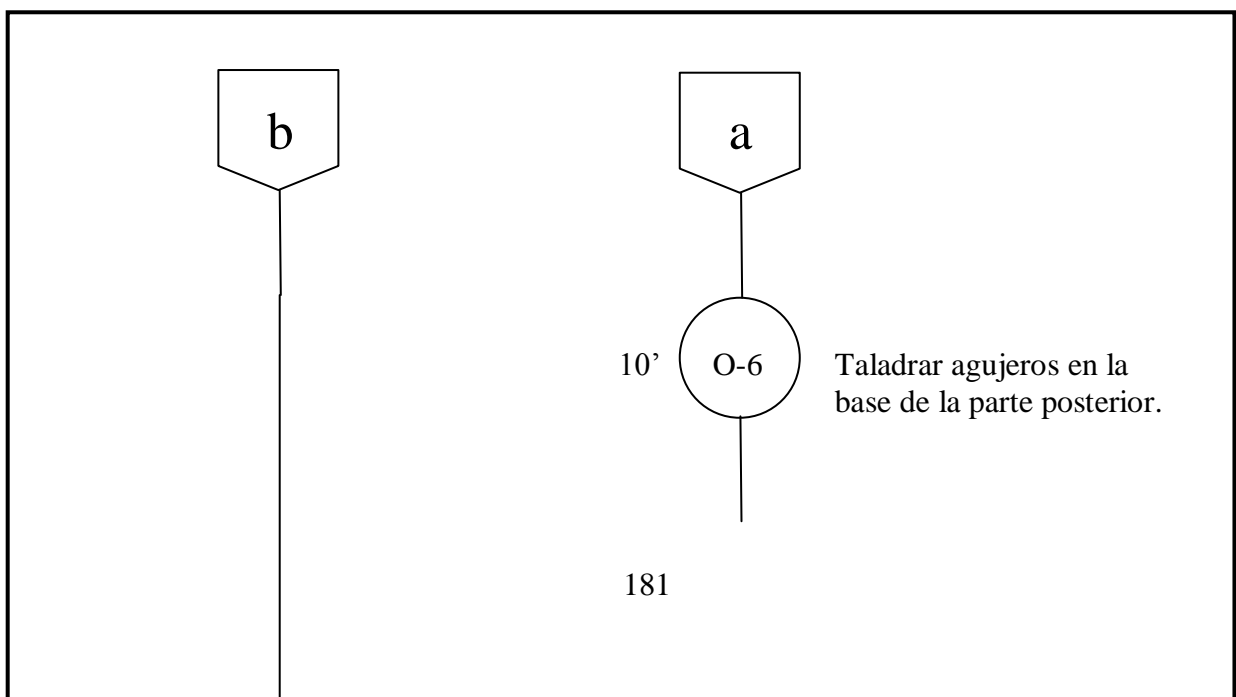


DIAGRAMA DE PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DE LAS BANDEJAS



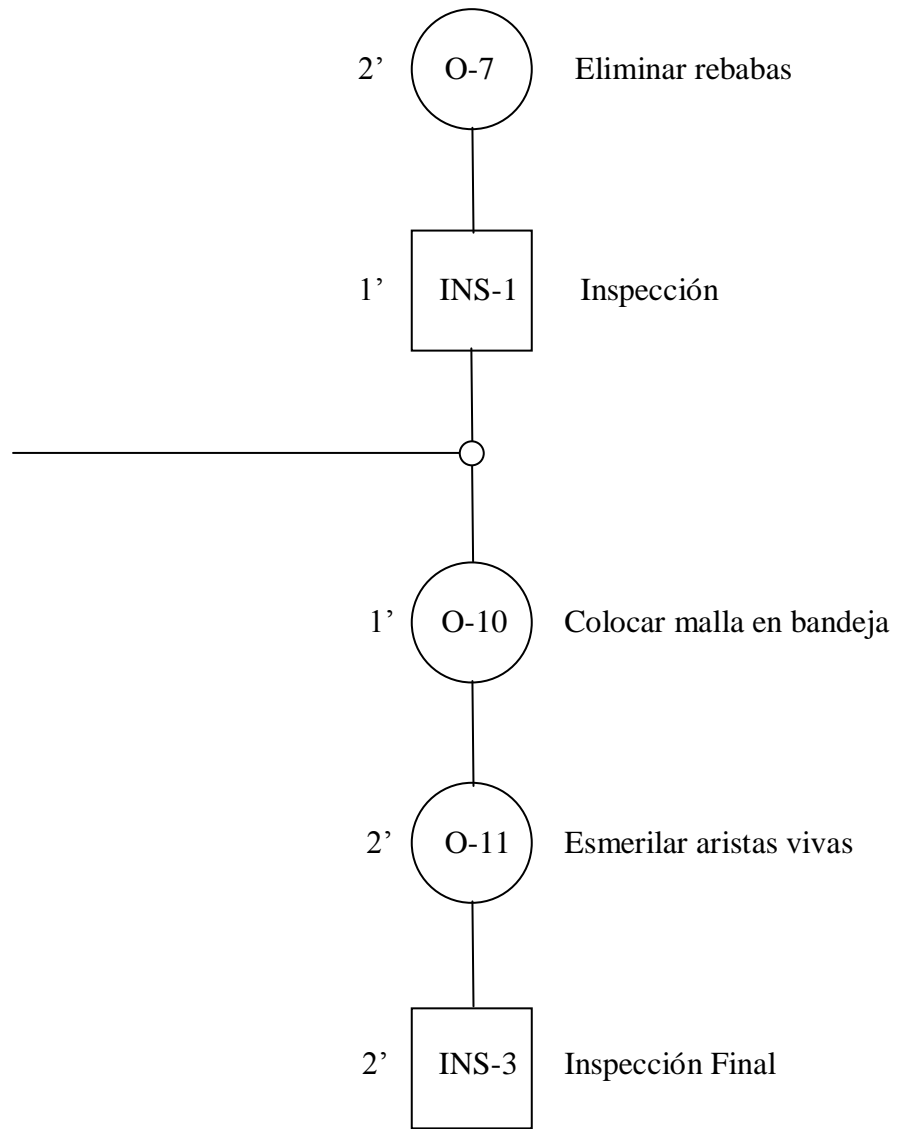
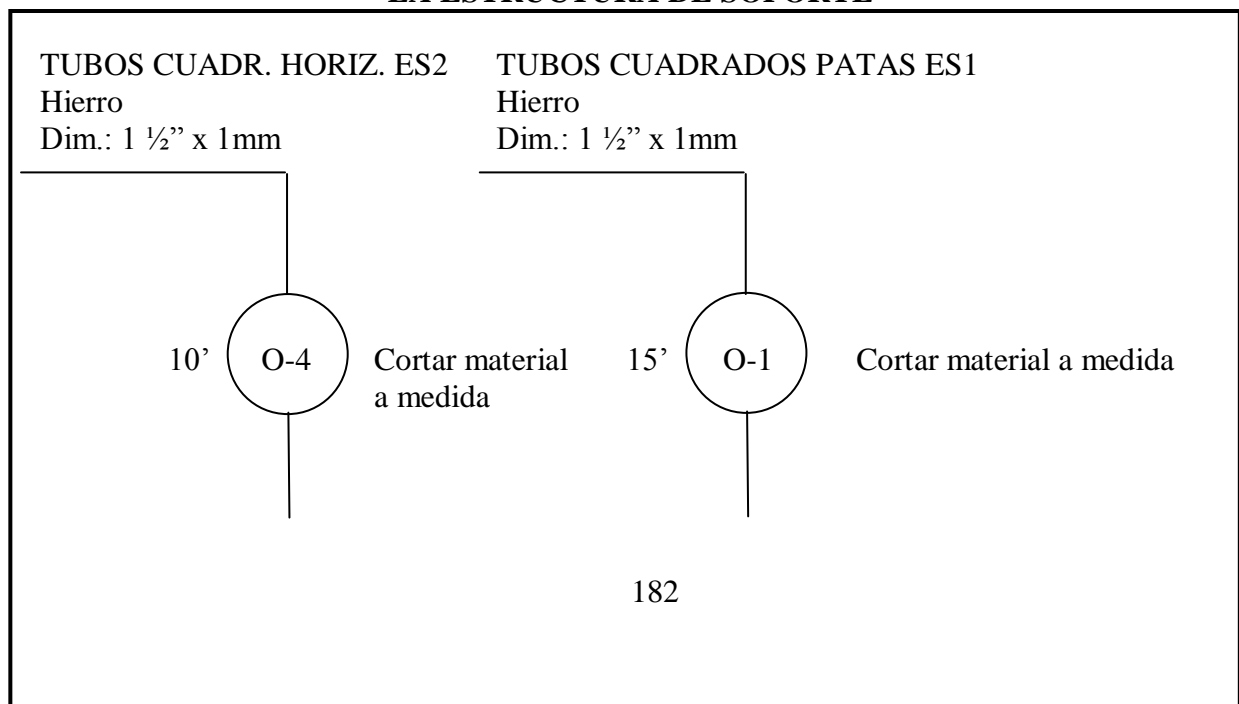


DIAGRAMA DE PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DE LA ESTRUCTURA DE SOPORTE



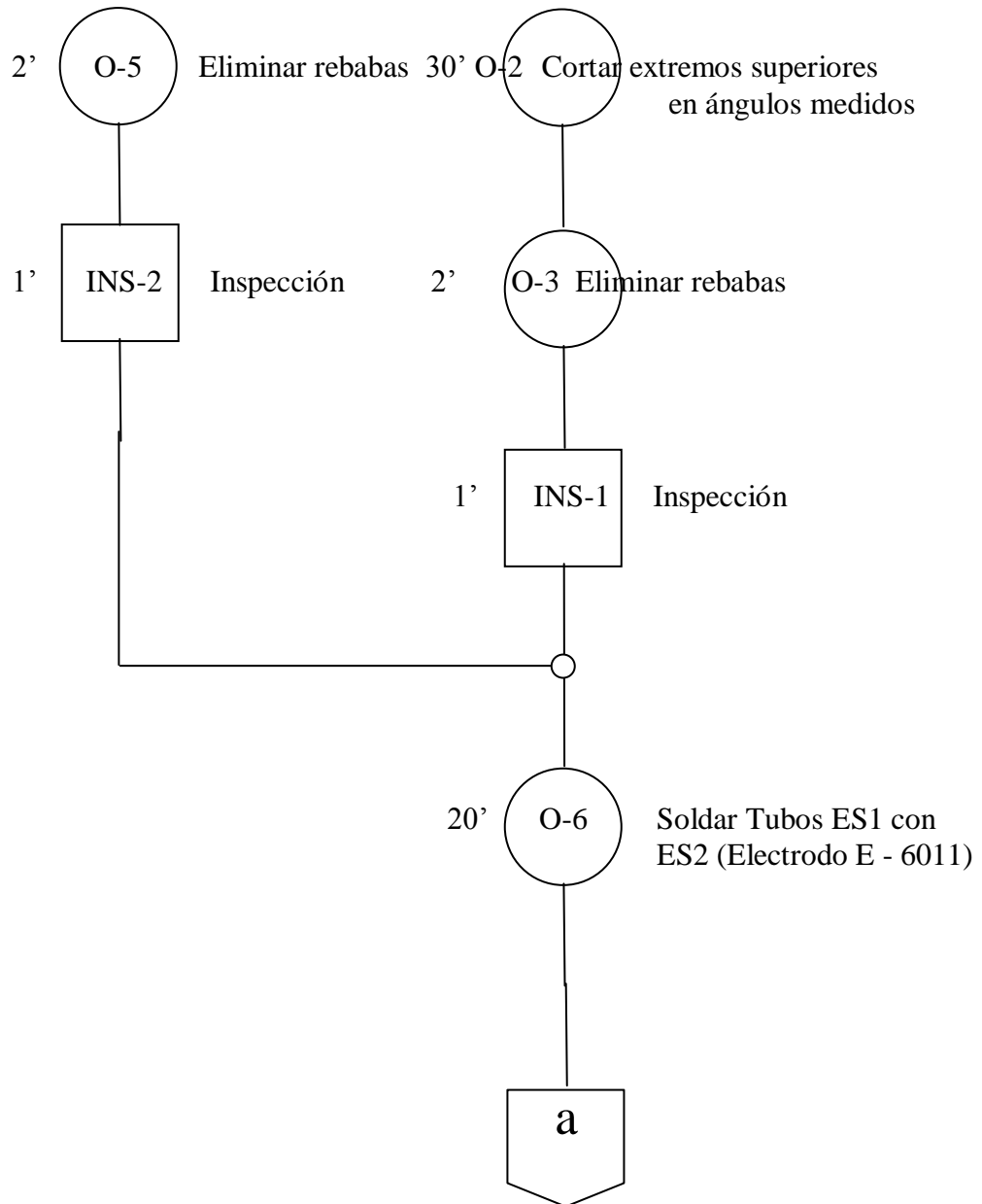


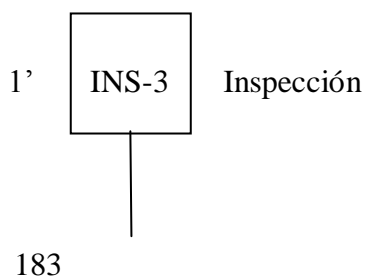
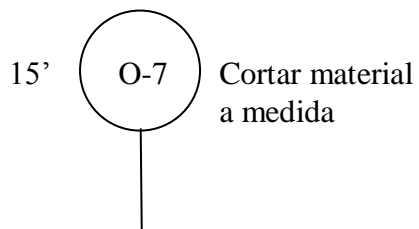
DIAGRAMA DE PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DE LA ESTRUCTURA DE SOPORTE

TUBOS CUAD. SOPORTE HORNO ES3

Hierro

Dim.: 1 1/2" x 1mm

a



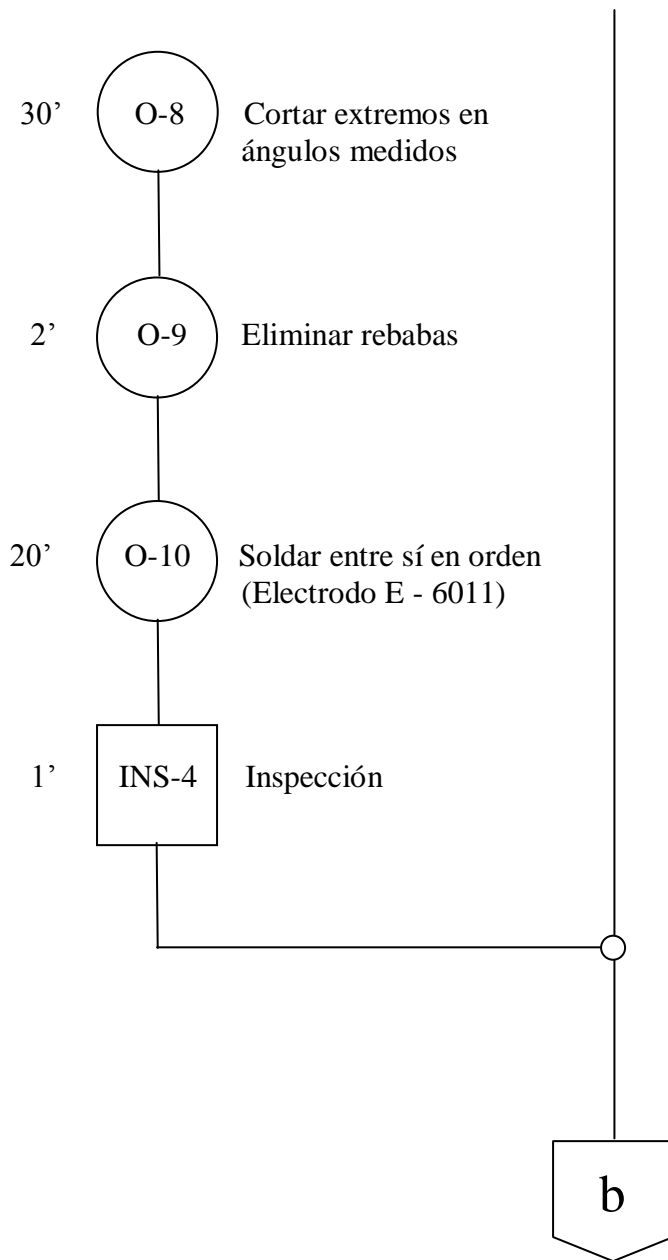
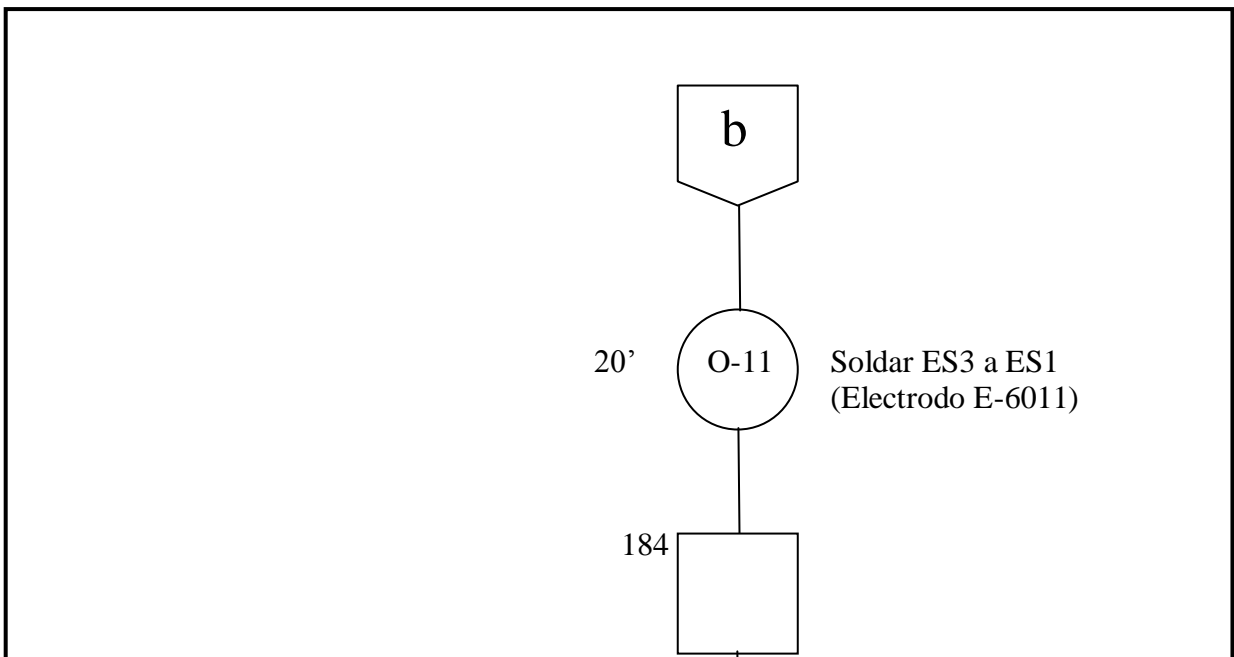


DIAGRAMA DE PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DE LA ESTRUCTURA DE SOPORTE



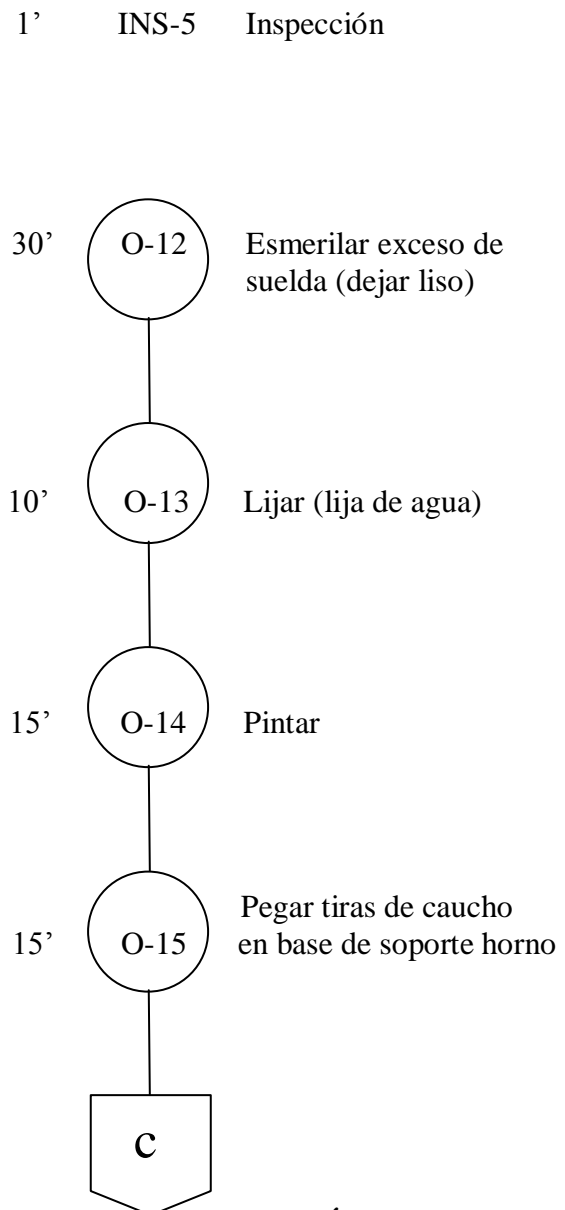
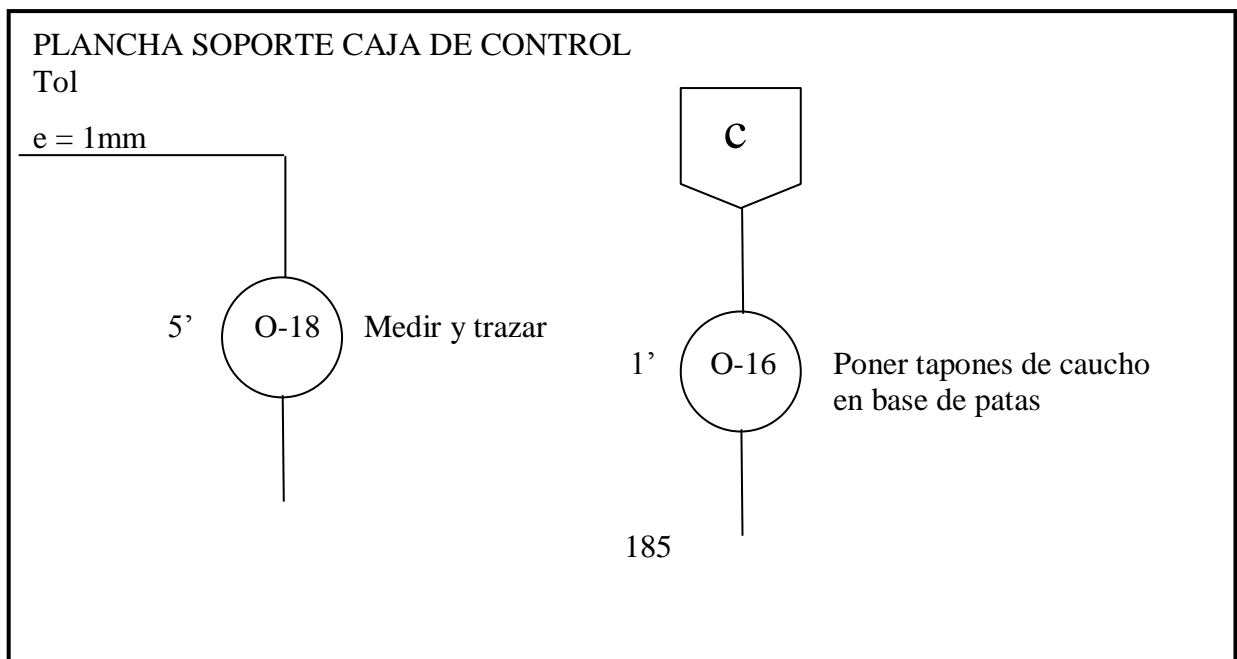


DIAGRAMA DE PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DE LA ESTRUCTURA DE SOPORTE



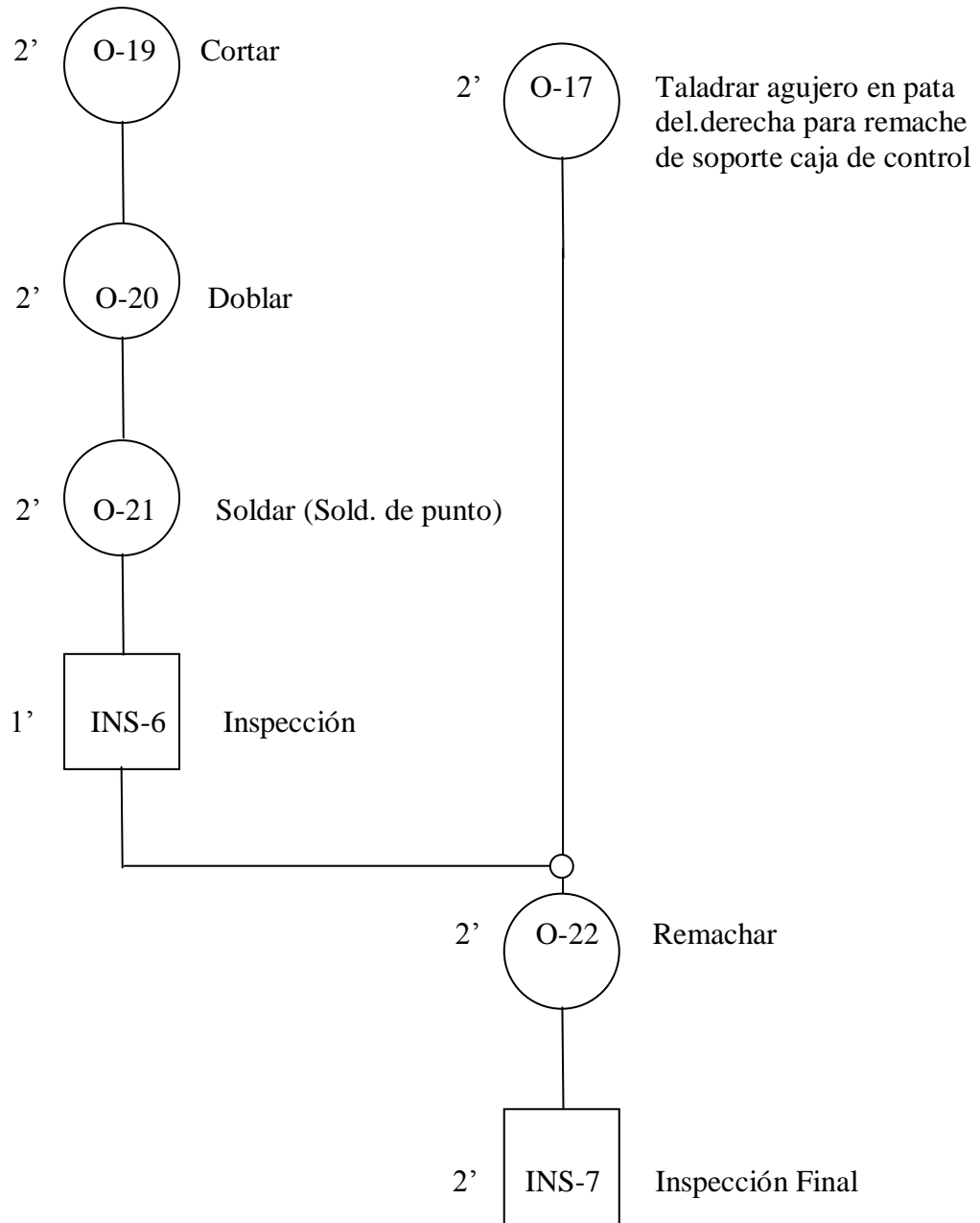
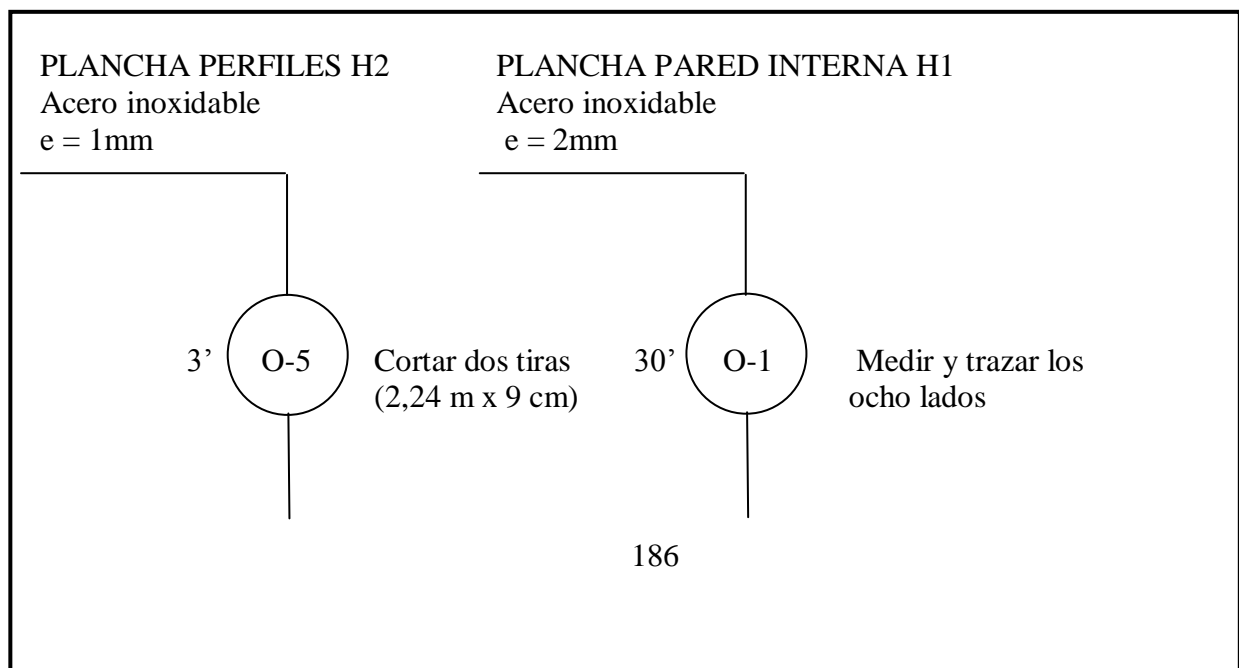


DIAGRAMA DE PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DEL HORNO



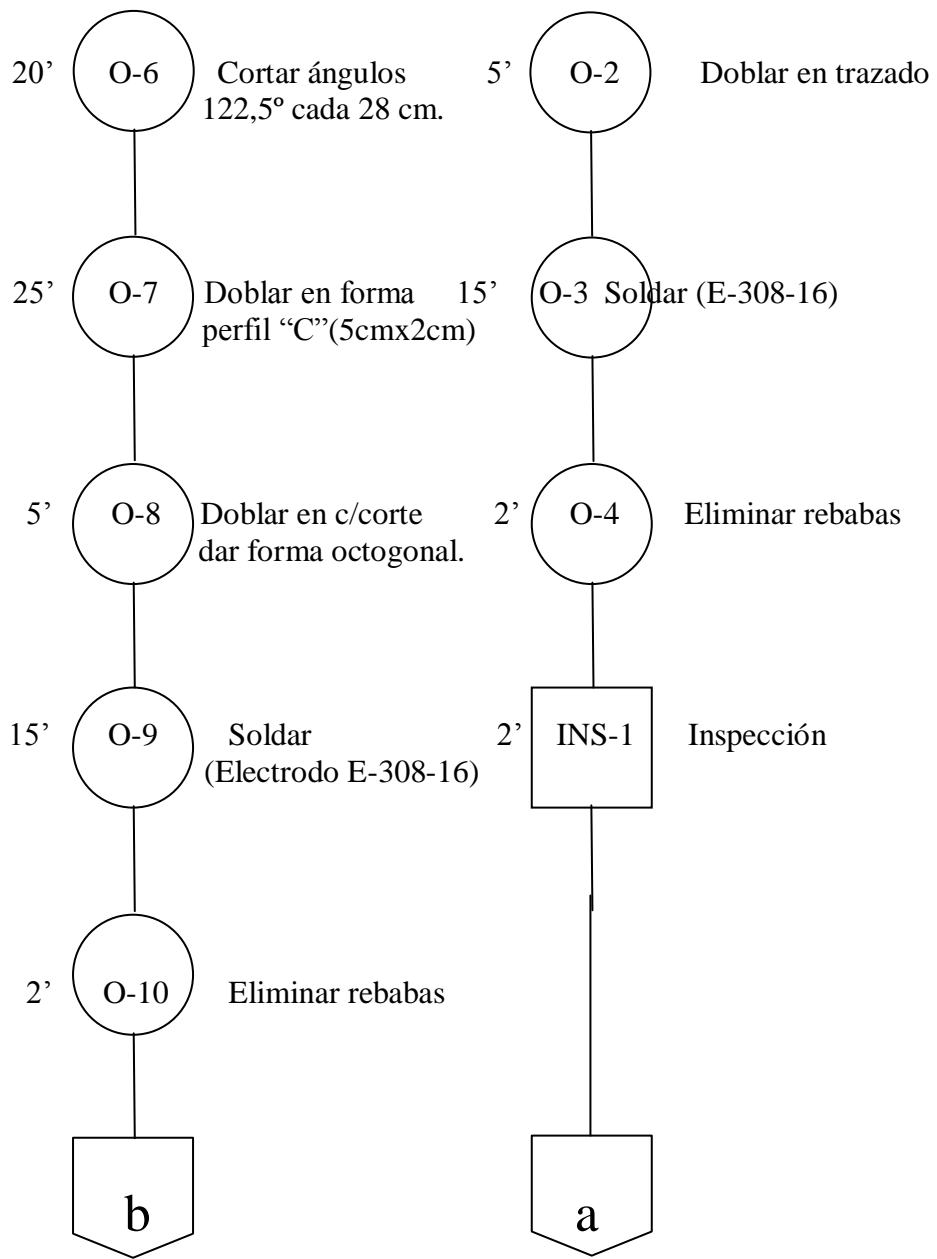
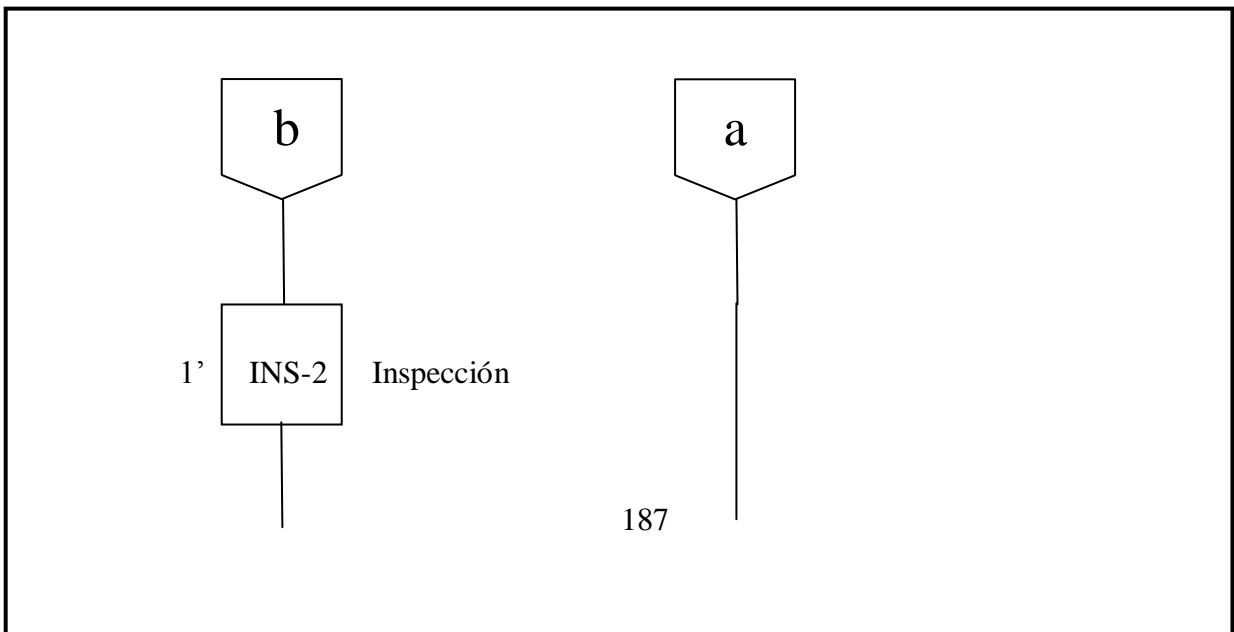


DIAGRAMA DE PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DEL HORNO



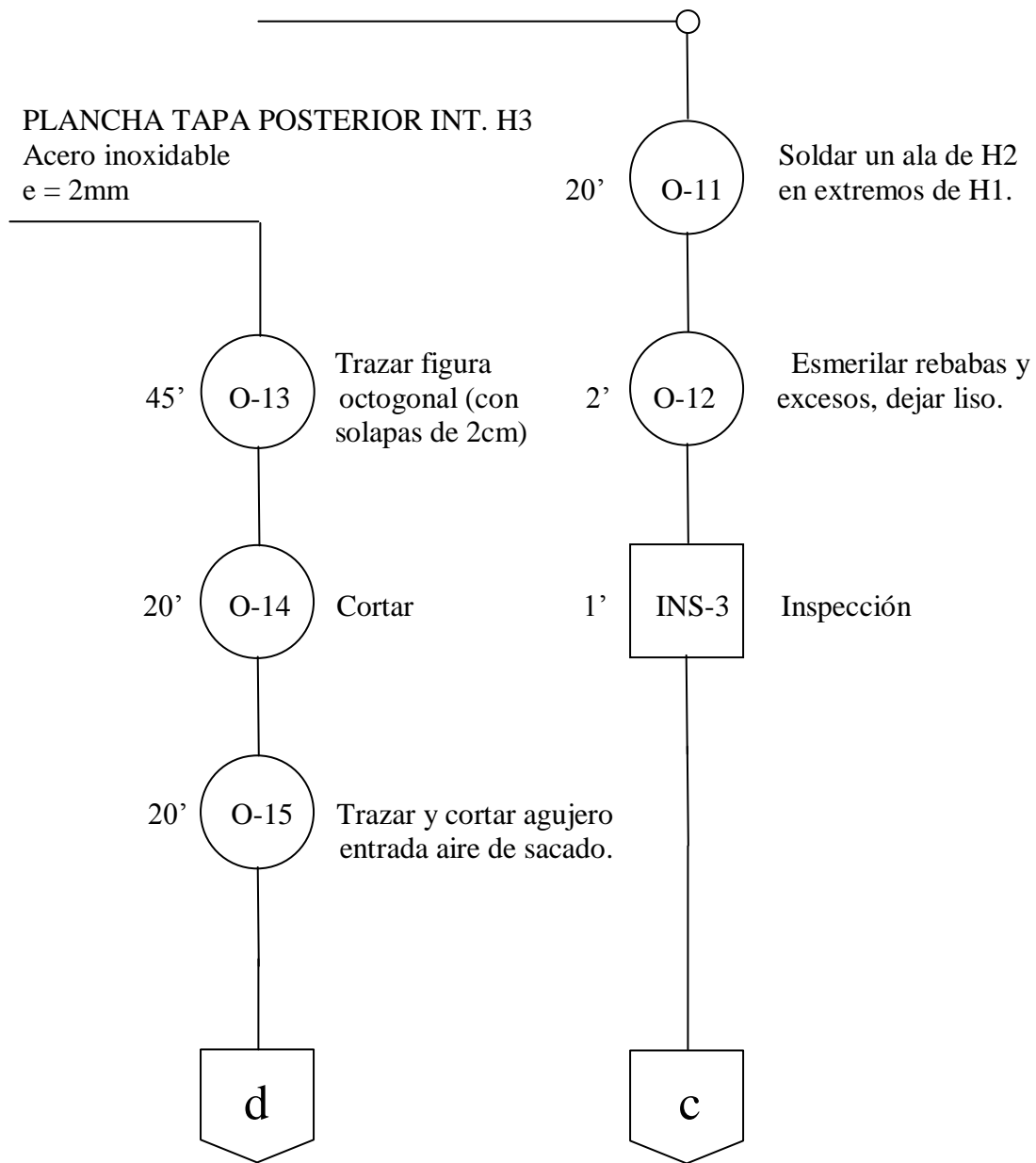
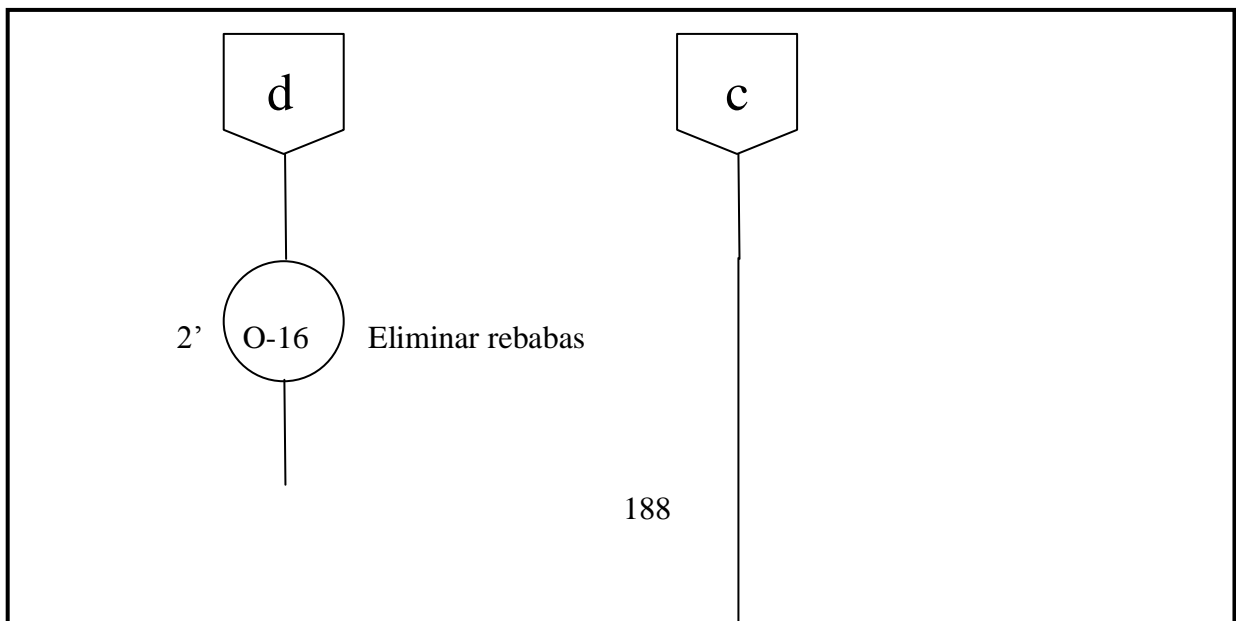


DIAGRAMA DE PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DEL HORNO



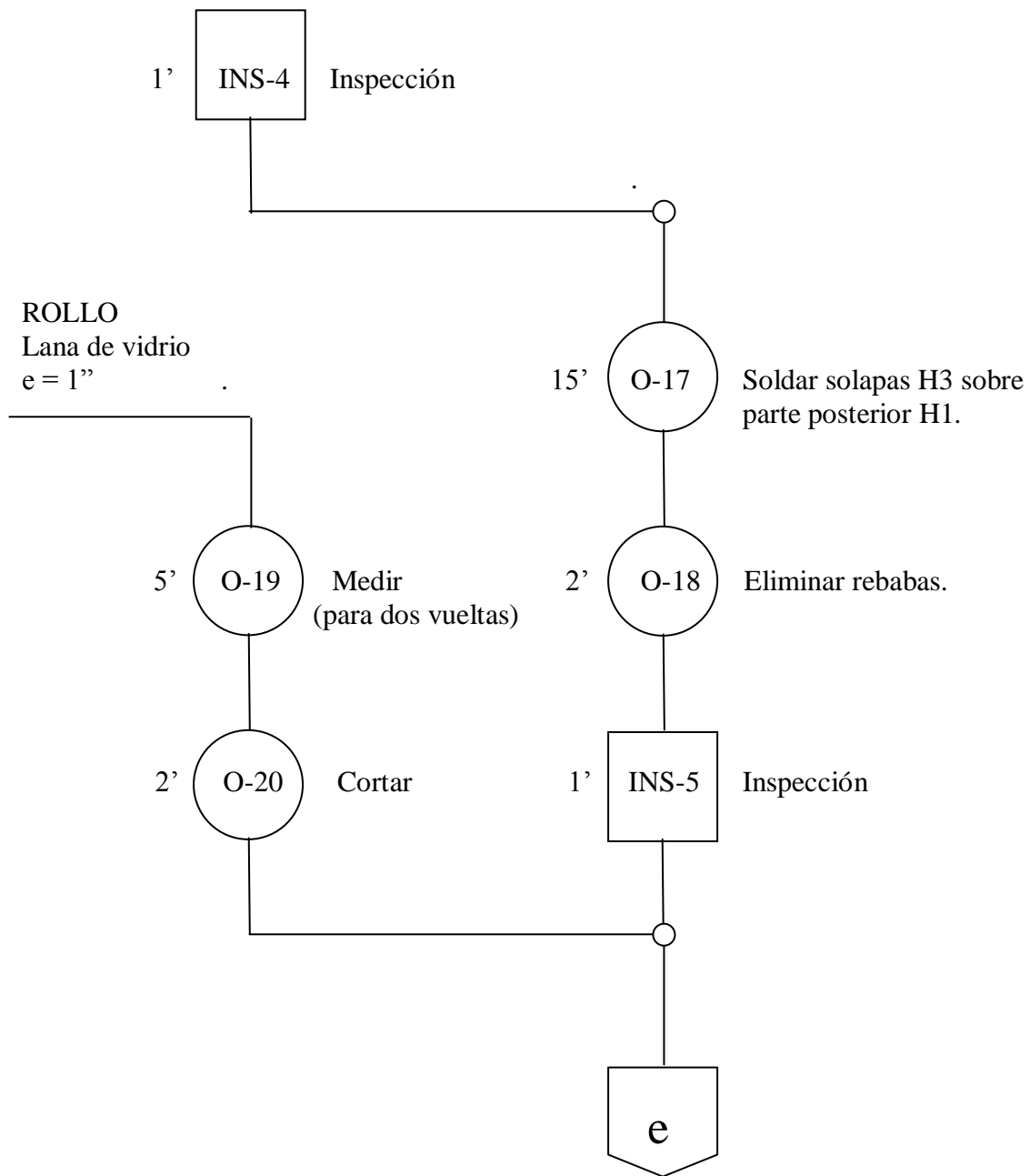
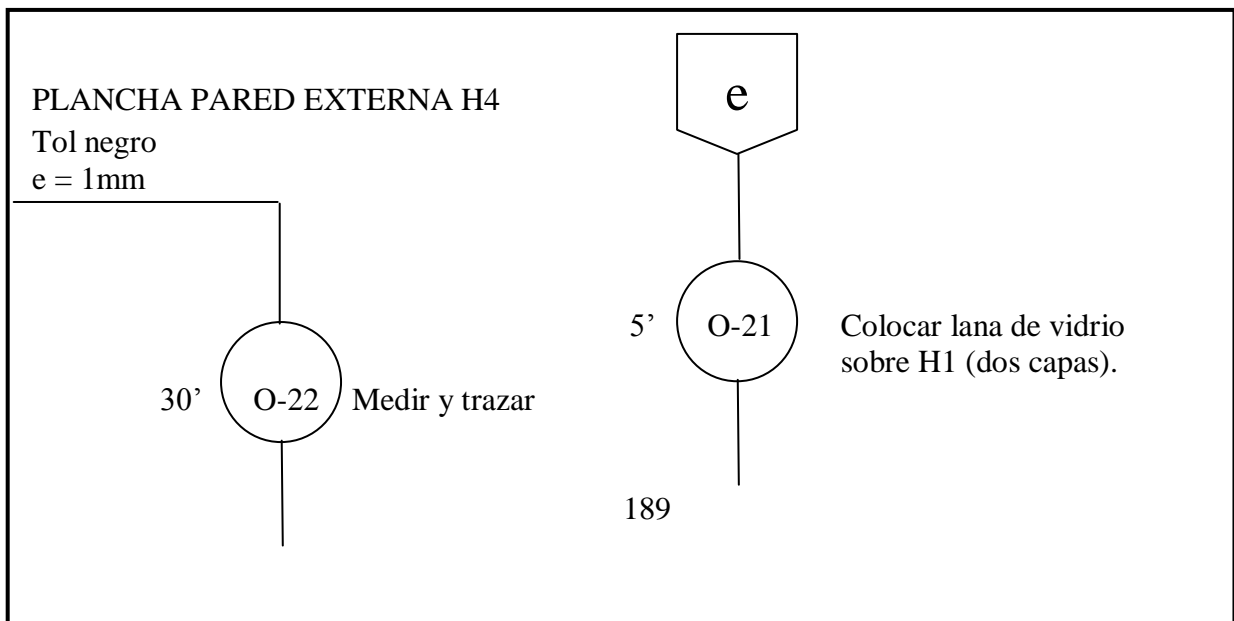


DIAGRAMA DE PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DEL HORNO



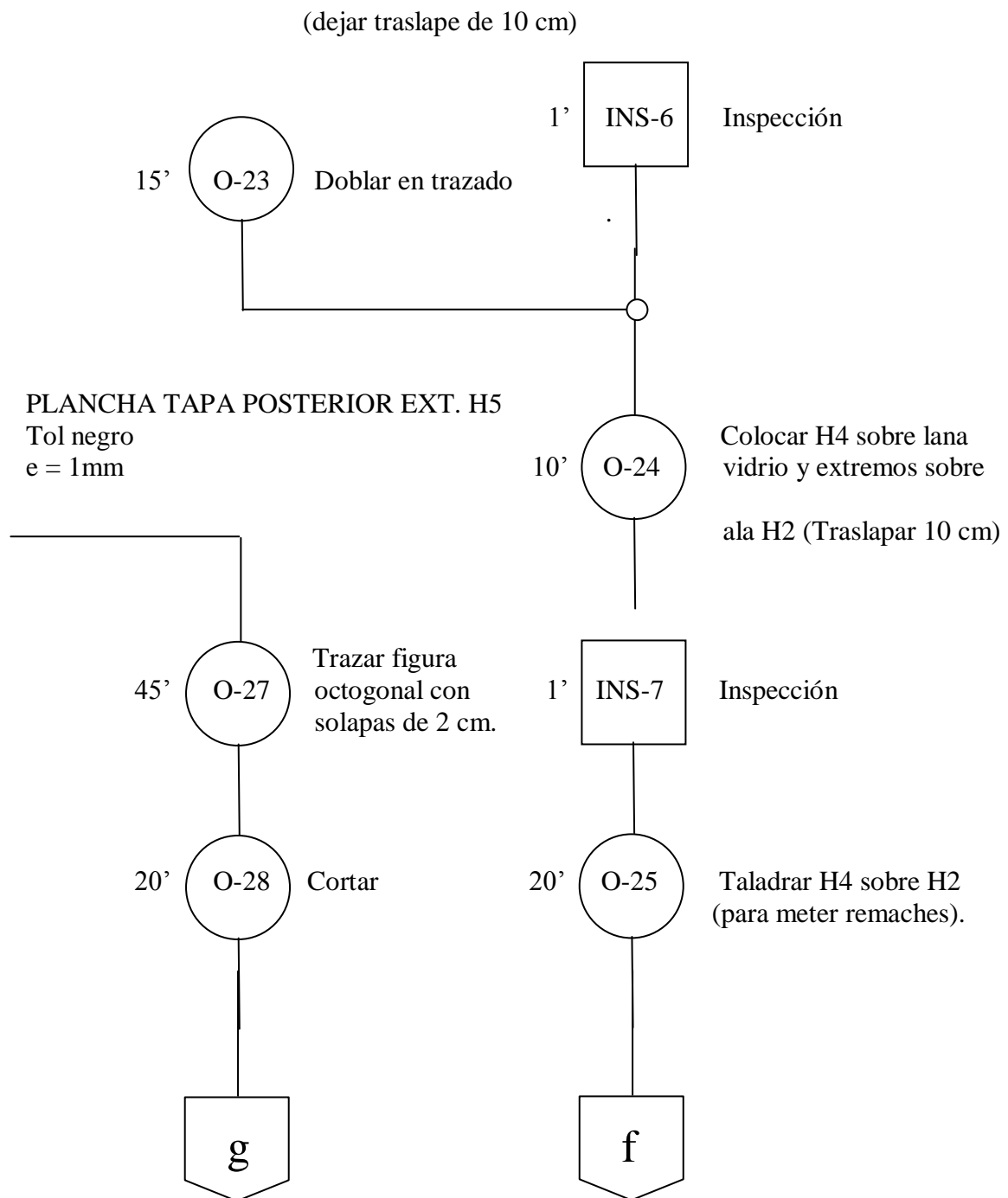
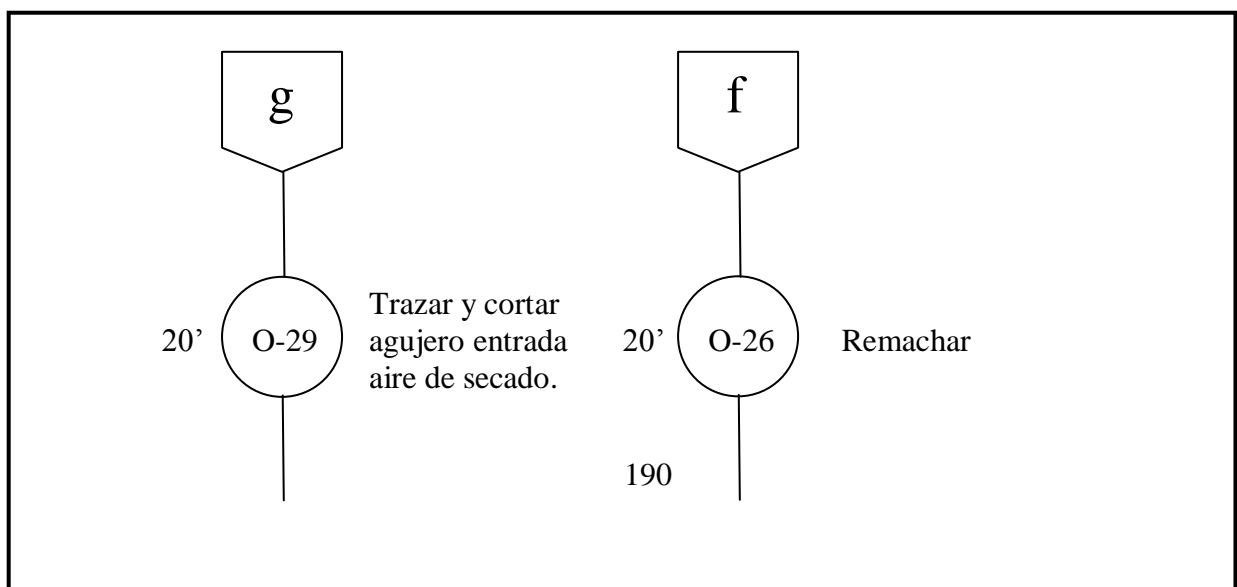


DIAGRAMA DE PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DEL HORNO



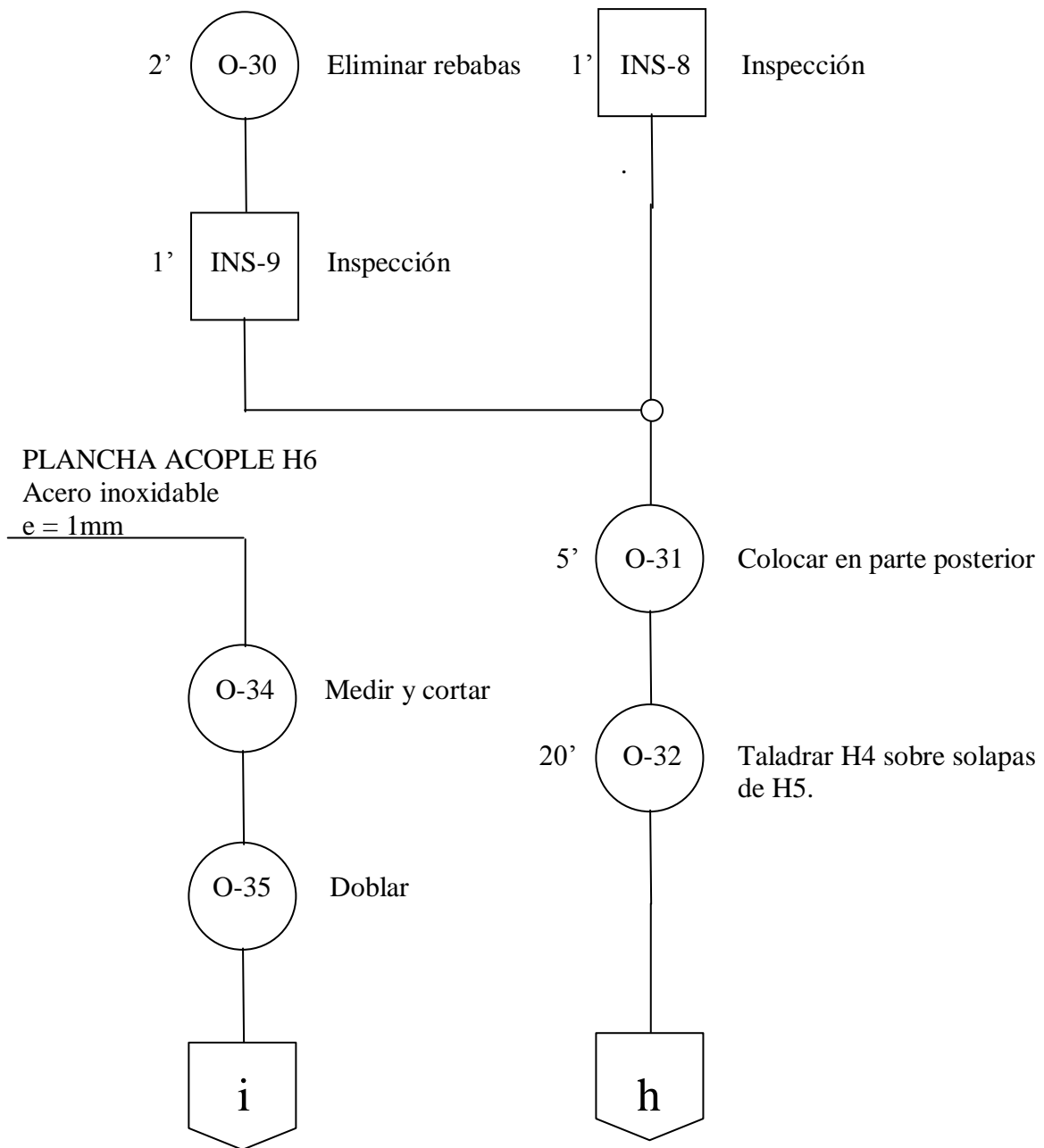
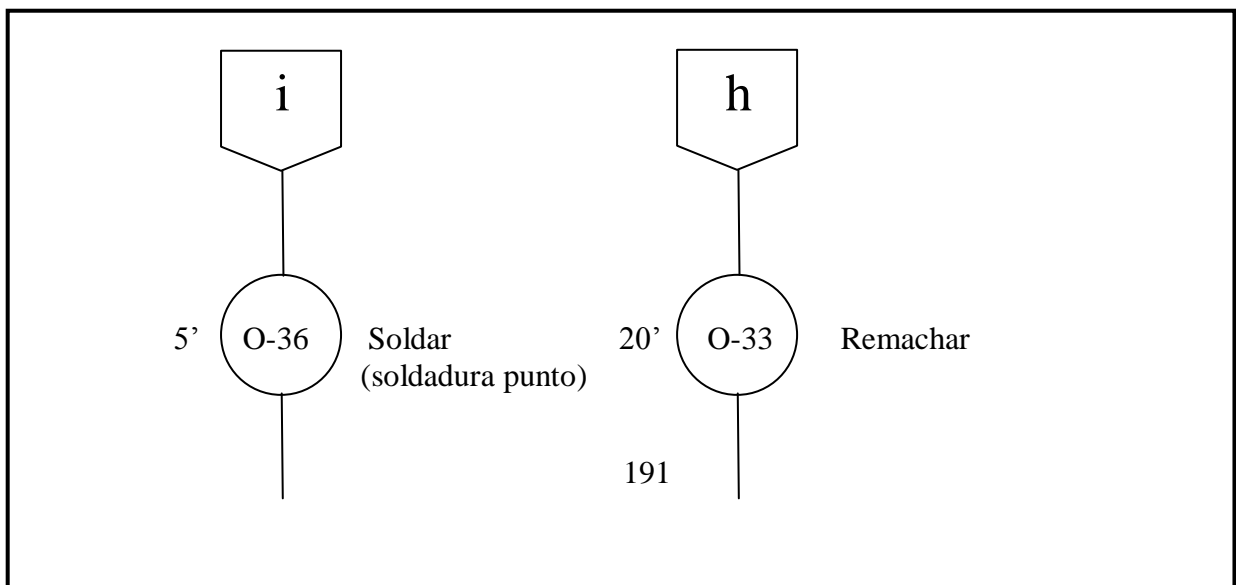


DIAGRAMA DE PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DEL HORNO



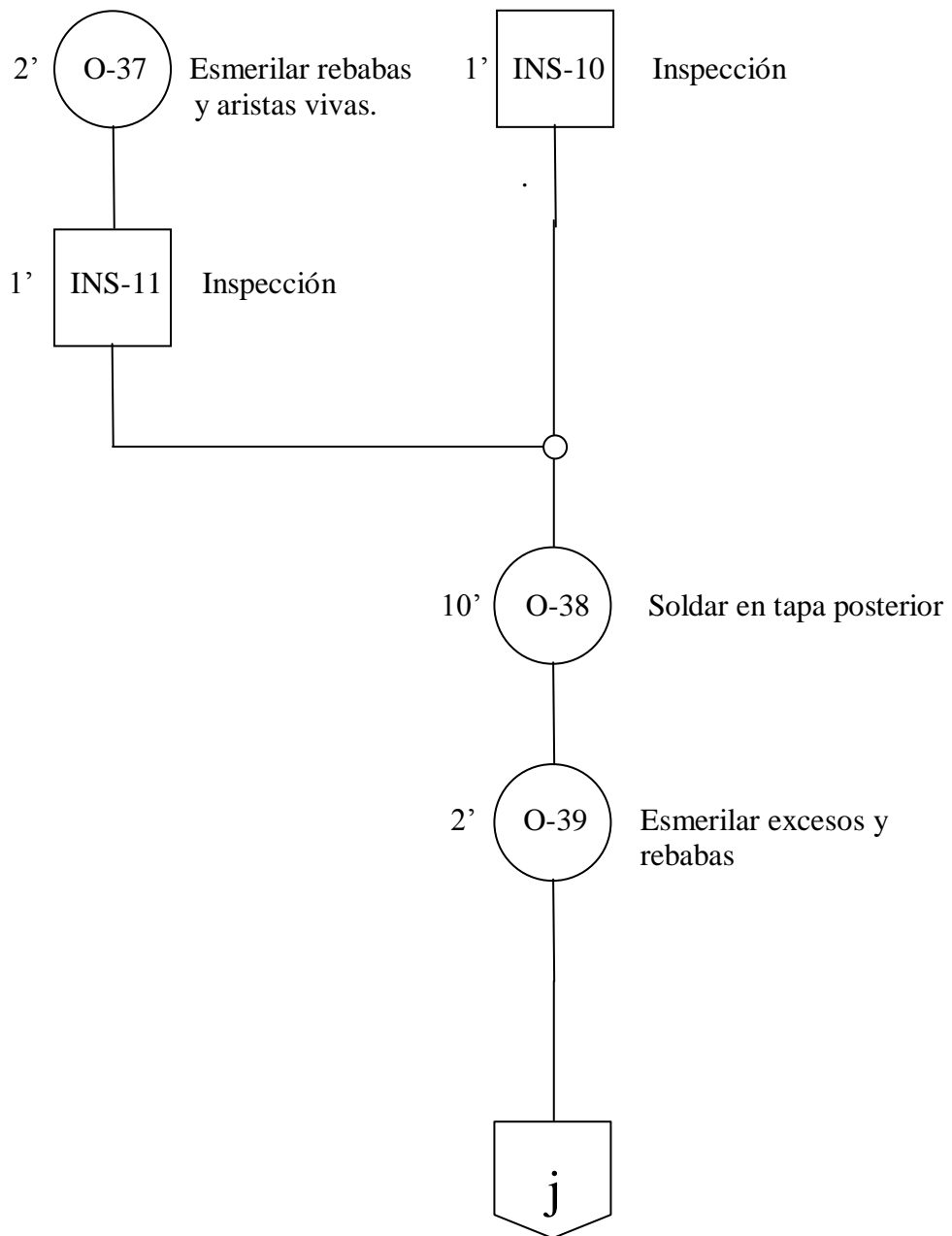
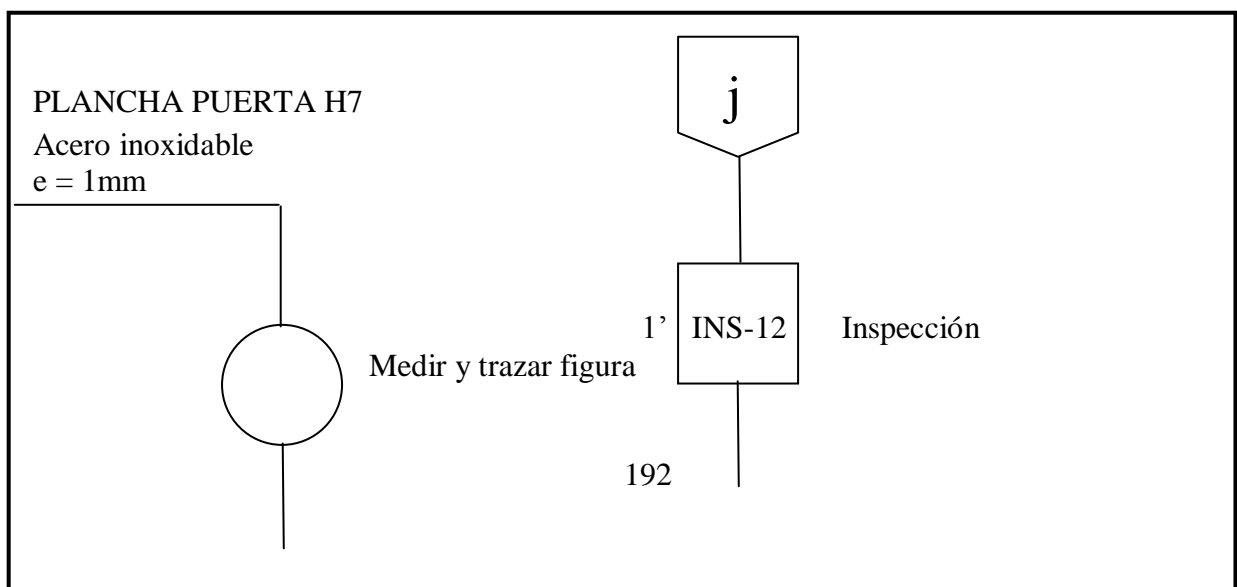


DIAGRAMA DE PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DEL HORNO



40' O-40 octogonal (2 iguales,
una con solapas 3 cm)

30' O-41 Cortar

10' O-42 Cortar y colocar Lana
de vidrio e=5cm.

20' O-43 Soldar (E-308-16)
Separación de 3cm entre
las dos planchas.

5' O-44 Soldar bisagras de
acero inoxidable.

1' INS-13 Inspección

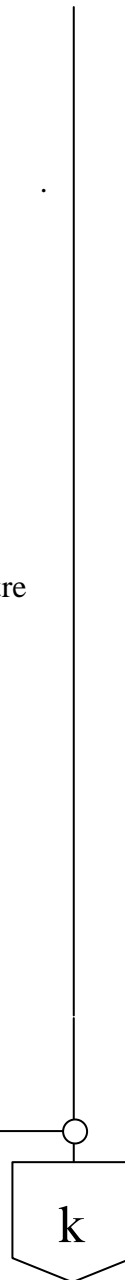


DIAGRAMA DE PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DEL HORNO

PERFIL "L" BASTIDOR SOP. BANDEJAS

Acero Inoxidable **k**

Dim. = 15 x 15x 2 mm

10' O-53 Medir y trazar

3' O-45 Cuadrar puerta en Horno

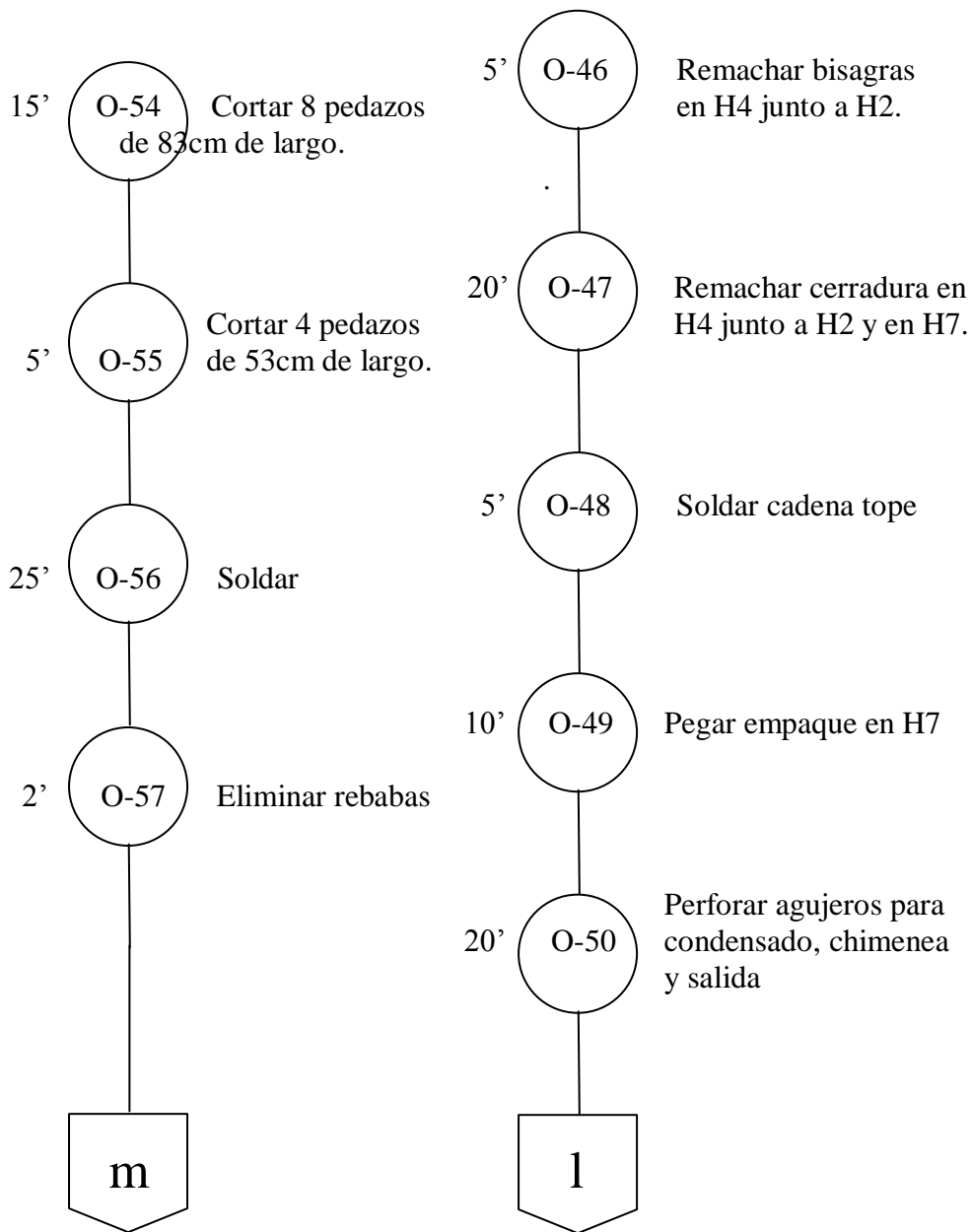
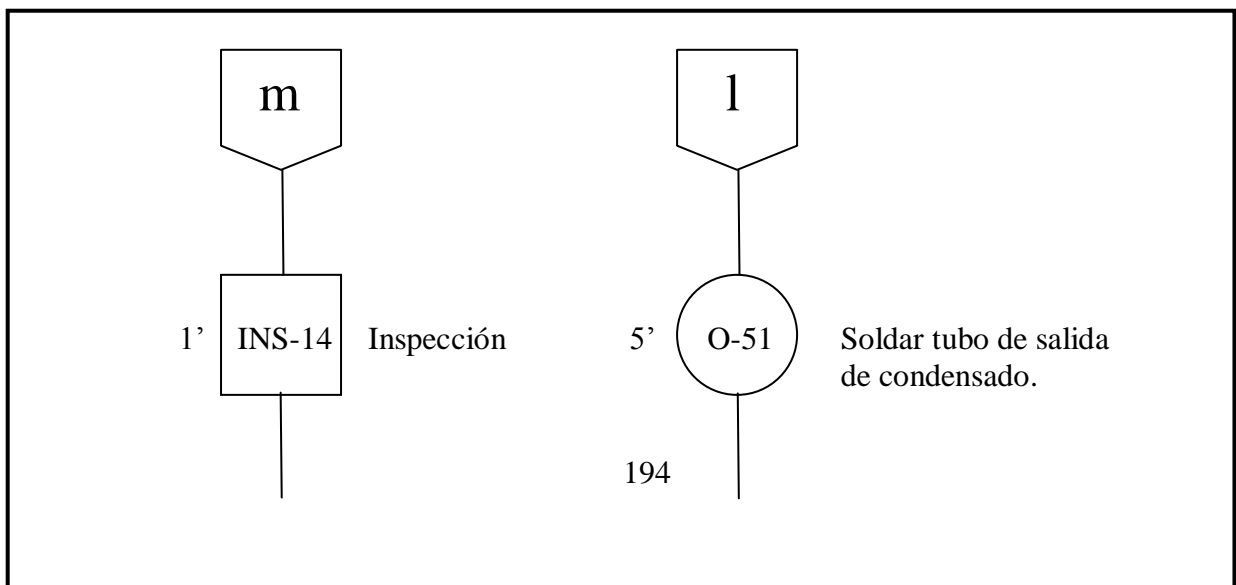


DIAGRAMA DE PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DEL HORNO



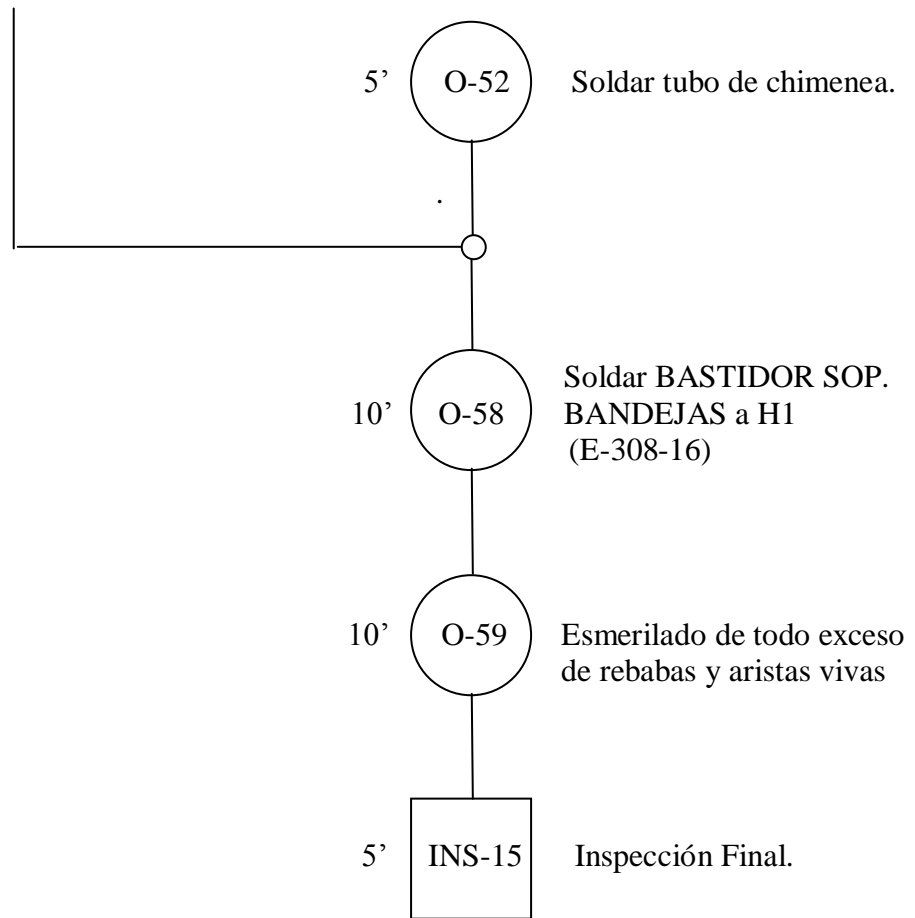
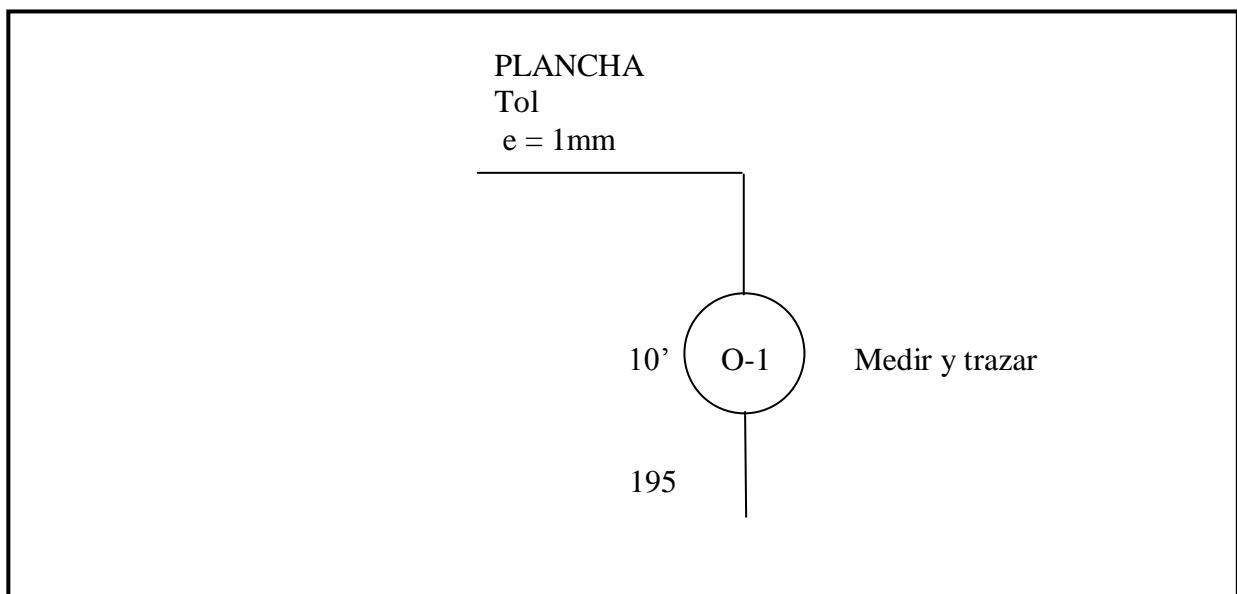


DIAGRAMA DE PROCESO DE CONSTRUCCIÓN ACOPLE INTERCAMBIADOR DE CALOR / HORNO



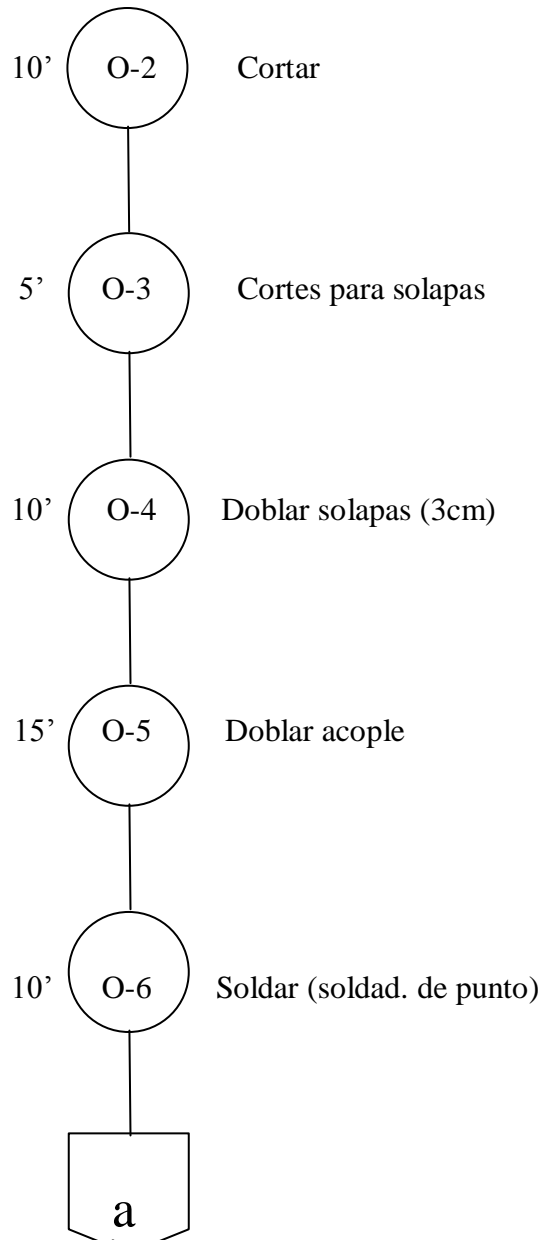
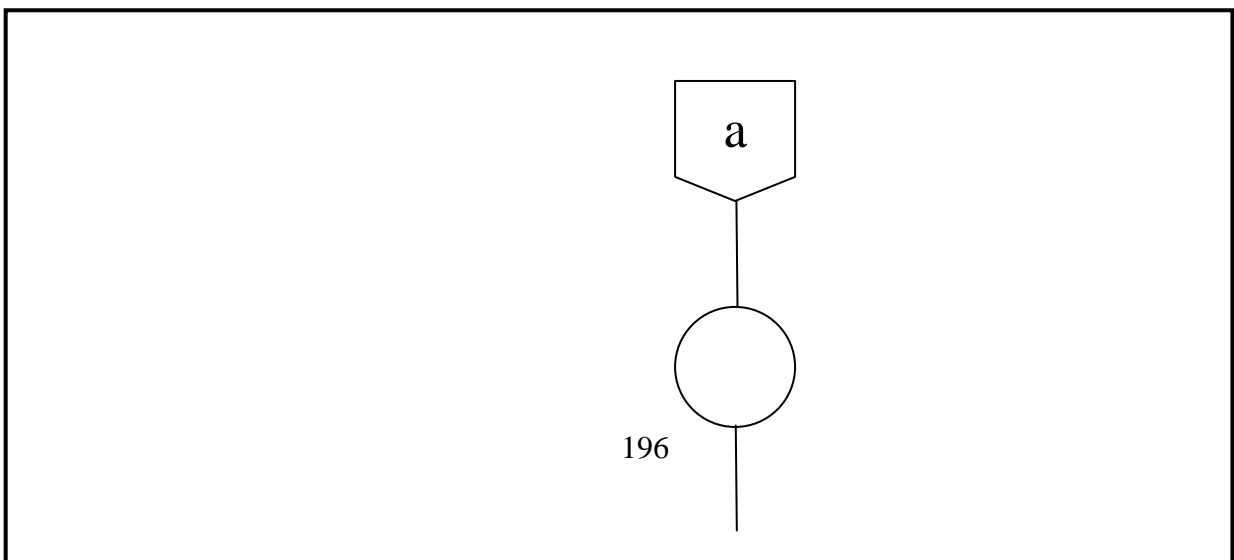


DIAGRAMA DE PROCESO DE CONSTRUCCIÓN ACOUPLE INTERCAMBIADOR DE CALOR / HORNO



15' O-7 Taladrar agujeros para pernos.

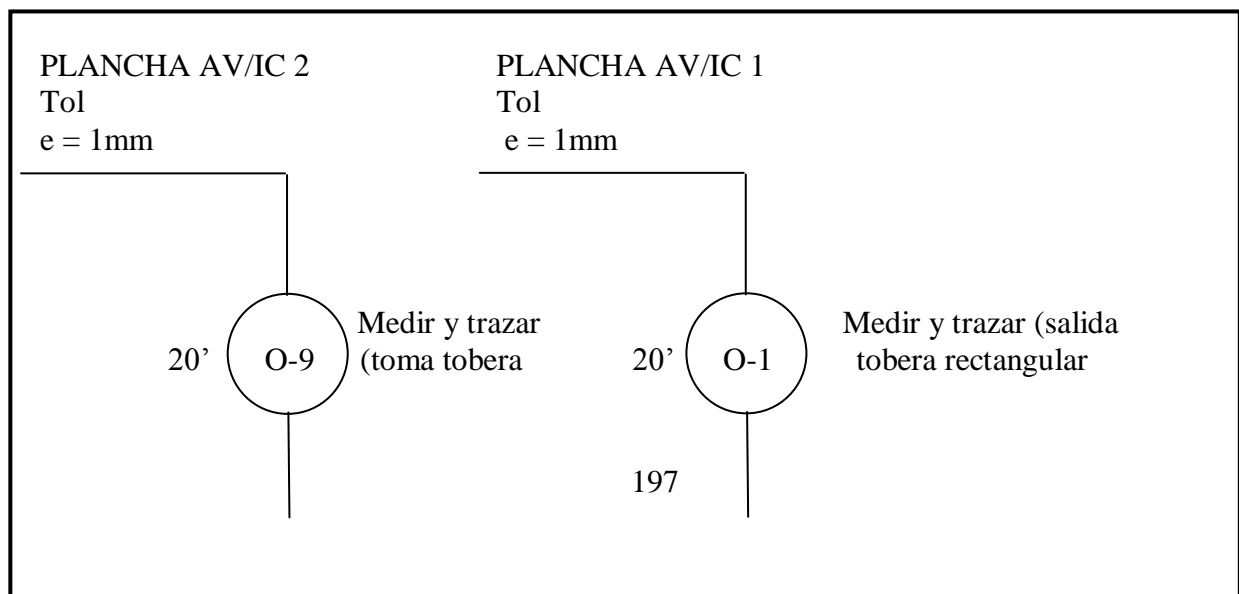
2' O-8 Eliminar rebabas y aristas vivas.

5' O-9 Lijar (lija de agua)

5' O-10 Pintar

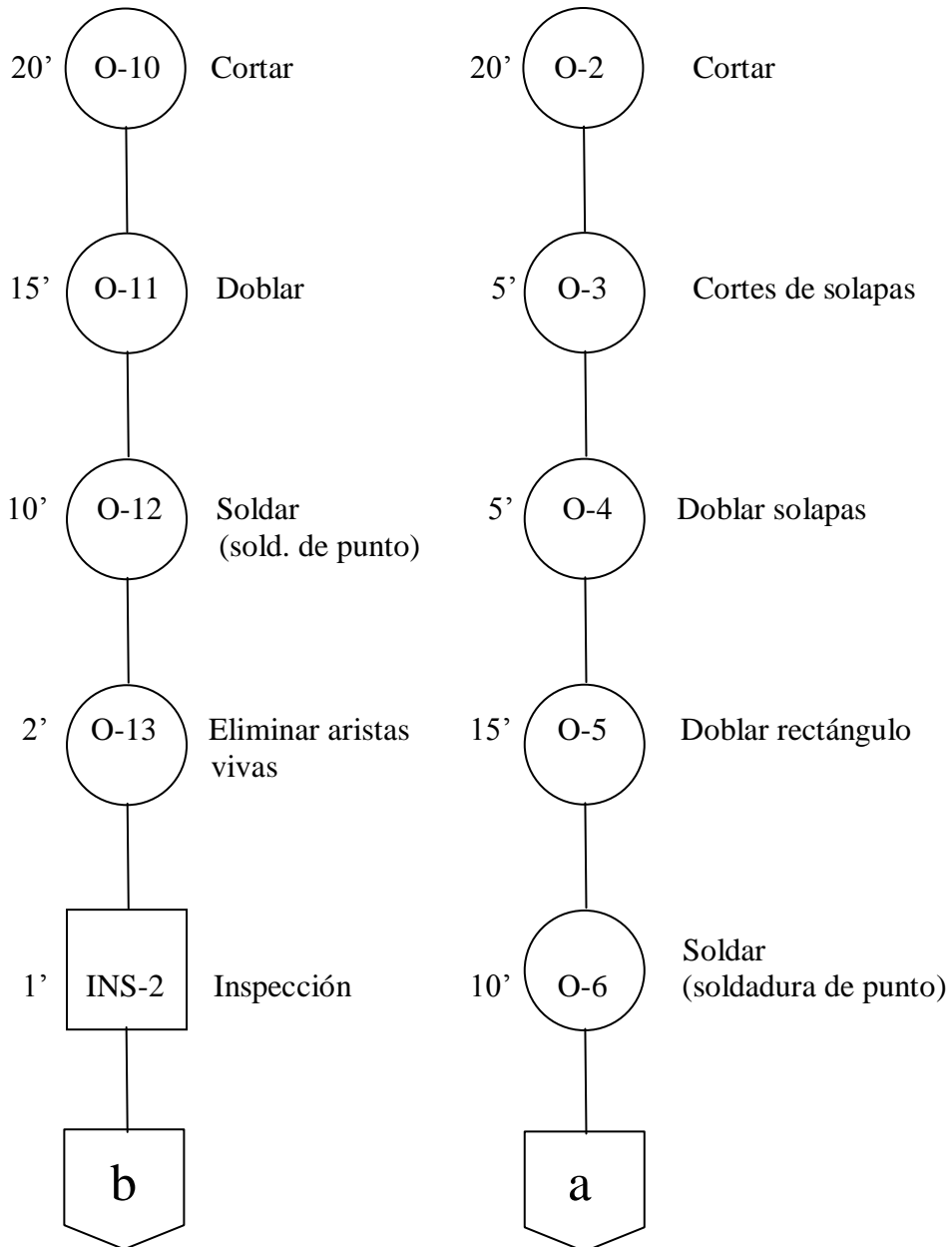
1' INS-1 Inspección Final

DIAGRAMA DE PROCESO DE CONSTRUCCIÓN ACOPLE VENTILADOR / INTERCAMBIADOR DE CALOR (TIPO TOBERA)

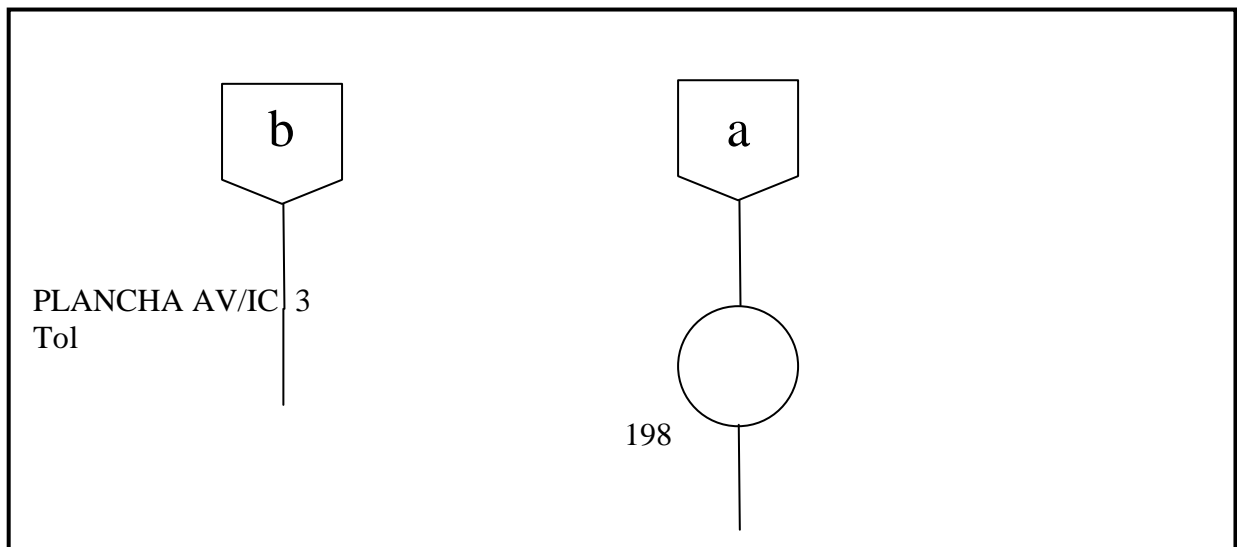


40x40x36cm)
(Ventilador)

27,3x14x10 cm)



**DIAGRAMA DE PROCESO DE CONSTRUCCIÓN ACOPLE
VENTILADOR / INTERCAMBIADOR DE CALOR (TIPO TOBERA)**



e = 1mm

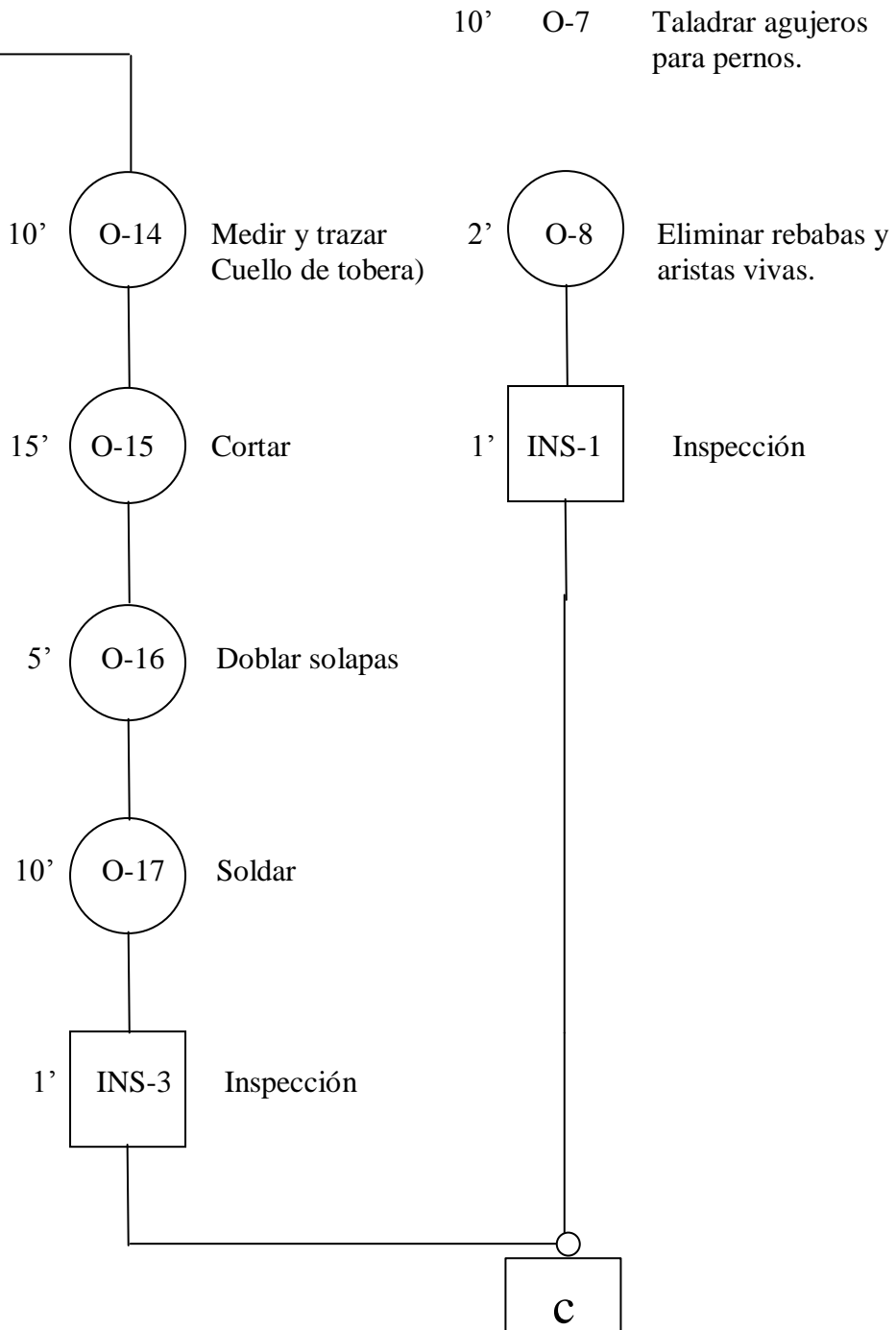
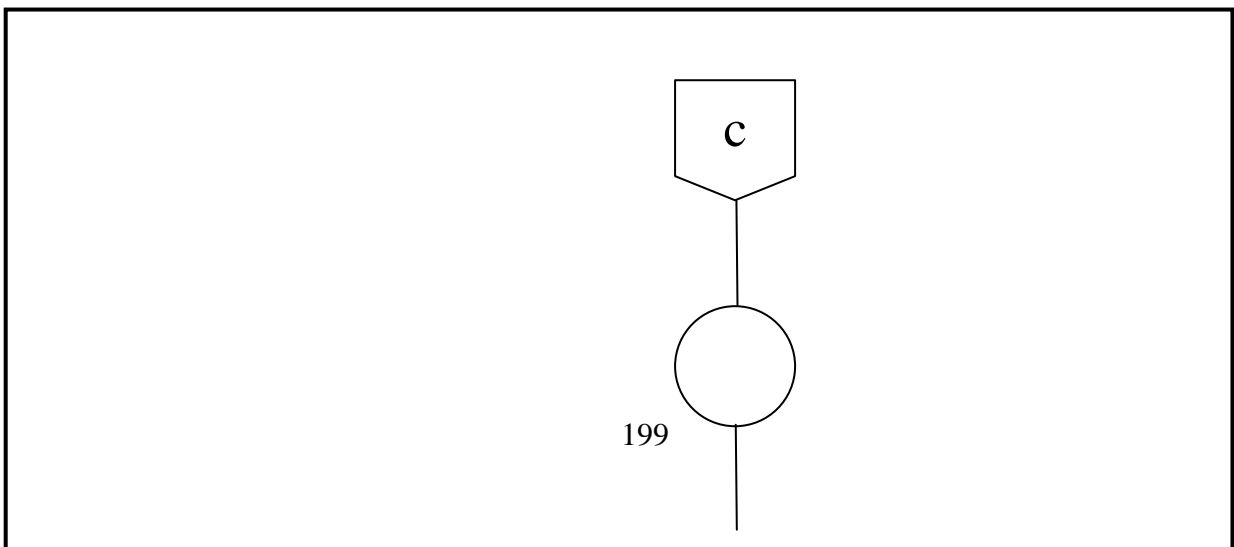


DIAGRAMA DE PROCESO DE CONSTRUCCIÓN ACOPLE VENTILADOR / INTERCAMBIADOR DE CALOR (TIPO TOBERA)



10' O-18 Soldar AV/IC3 con AV/IC2

10' O-19 Soldar AV/IC3 con AV/IC1

2' O-20 Eliminar rebabas y aristas vivas.

5' O-21 Lijar (lija de agua)

10' O-22 Pintar

2' INS-4 Inspección Final

CAPÍTULO 7

PRUEBAS Y RESULTADOS

7.1 PLAN DE PRUEBAS

Las pruebas que realizaremos tienen como fin comprobar el correcto funcionamiento del mismo, y obtener los diferentes comportamientos de las frutas que vamos a secar, como son el tiempo de secado y el porcentaje de humedad final reales, para así determinar las curvas de secado experimental de cada una de ellas.

Para lograr esto deberemos medir los siguientes parámetros:

- Temperatura del aire ambiente [°C]
- Humedad relativa del aire ambiente a la entrada [%]
- Humedad específica del aire [$\text{Kg}_{\text{agua}}/\text{Kg}_{\text{aire seco}}$]
- Temperatura del aire que entra en la cámara [°C]
- Temperatura de bulbo seco [°C]
- Temperatura de bulbo húmedo [°C]
- Peso inicial total de cada una de las frutas en las bandejas [Kg]
- Peso final total de cada una de las frutas en las bandejas [Kg]
- Humedad en base húmeda de las frutas [%]
- Humedad en base seca de las frutas [%]
- Tiempo [min]

Para la medición de cada uno de éstos parámetros utilizaremos los siguientes instrumentos:

- 1) Control de Temperatura

- Pirómetro:
Marca CAMSCO
Tipo TC-72N
Voltaje de 110V ó 220V
Termocupla Tipo J
Rango de 0°C – 199°C

- Termómetro láser:
Rango de 0°C – 500°C
Apreciación de 0,1°C

2) Control de Humedad

- Higrómetro
Apreciación de Humedad del 1%

3) Control de Peso:

- Balanza Digital:
Apreciación de 0,001 Kg.

4) Control de Tiempo:

- Cronómetro Digital:
Marca CASIO
Rango de 0 a 99 Horas
Apreciación de 0,01 segundos

Teniendo estos instrumentos, entonces continuaremos con las pruebas, para lo cuál se va a seguir un procedimiento, el cuál vamos a detallar a continuación:

- 1) Pelar la fruta que se va a deshidratar.

- 2) Cortar en rodajas (para el caso de la manzana o el durazno).
- 3) Lavar bien la fruta.
- 4) Medir la humedad del ambiente y dentro de la cámara.
- 5) Encender la cámara de combustión del intercambiador de calor con cascarilla de arroz.
- 6) Encender el control del horno.
- 7) Programar el control de temperatura para un máximo de temperatura de deshidratación de la fruta.
- 8) Precalentar el horno hasta la temperatura en que la fruta va a ser deshidratada por al menos 5 minutos.
- 9) Pesar las bandejas.
- 10) Pesar la fruta.
- 11) Colocar las frutas en las bandejas.
- 12) Abrir el horno, meter las bandejas y cerrar bien la puerta del horno.
- 13) Encender el cronómetro digital.
- 14) Cada media hora medir lo más rápido posible la temperatura de la fruta, el peso y la humedad en el interior de la cámara, para no perder mucho calor de la misma.
- 15) Seguir alimentando constantemente la cámara de combustión con la cascarilla.

- 16) Rotar cada cierto tiempo las bandejas, tratando de que permanezcan la misma cantidad de tiempo cada una en las 4 diferentes posiciones dentro de la cámara.
- 17) Una vez llegado al punto en el que el peso del producto no varía mucho, se ha llegado al porcentaje de humedad esperado en la fruta, entonces sacar las bandejas, apagar todo el sistema y pesar solo la fruta.
- 18) Realizar la medición de la temperatura de la fruta, la humedad de la cámara y el tiempo total transcurrido en el proceso.
- 19) Observar las características físicas finales del producto y probar su sabor final, para compararlo con sus características iniciales.
- 20) Realizar todos los cálculos para determinar el correcto funcionamiento del sistema de secado, registrar todos los datos y obtener las tablas correspondientes, para su respectivo análisis posterior.

7.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Una vez que hemos realizado todas las pruebas, con las distintas frutas y hemos obtenido todos los datos necesarios, podemos ver que el horno se ha comportado de la manera esperada, lo cual nos ha llevado a obtener un producto de buena calidad, que casi no ha perdido sus propiedades originales, y además es capaz de recuperar sus características físicas originales al meterlo en agua por alrededor de una hora.

Los tiempos de secado calculados teóricamente no varían mucho de los obtenidos en la práctica, lo cual nos da a entender que el horno tuvo un buen desempeño.

No se pudo observar que se produzca condensado en las paredes del horno, esto debido a que el aislamiento térmico de las paredes es muy bueno y no permite que éstas se enfríen por las condiciones del ambiente externas al horno. Sin embargo se produjo

agua que salía de la misma fruta, es decir una especie de néctar o miel que se produce por la deshidratación de la misma, lo que si nos produce líquidos que a la final terminan saliendo por el desfogue, y así se evita perder energía en calentarlos.

Se pudo observar que el flujo del aire dentro del horno nos es tan homogéneo, ya que las bandejas superiores estaban mas calientes que las de abajo, así que se hizo muy bien al rotar la posición de las bandejas dentro de la cámara.

El uso de cascarilla de arroz como biomasa para el calentamiento del intercambiador de calor, nos resultó muy eficiente, ya que lograba subir las temperaturas del horno hasta las que necesitábamos en muy poco tiempo. Es un combustible que realiza una muy buena combustión, porque además pudimos observar que al estar bien prendido no salía humo muy negro.

Pudimos observar que las humedades al final del proceso casi se mantenían constantes hasta llegar a la humedad esperada.

Con los datos obtenidos durante los procesos, hemos podido graficar las curvas promedio de secado para cada una de las frutas, lo que nos puede ayudar en un futuro a determinar el tiempo necesario para dejar este tipo de frutas en un porcentaje de humedad de bulbo húmedo más alto que el que estamos utilizando para estas pruebas.

Es así que a continuación podemos ver las curvas de secado para cada una de las tres frutas que hemos utilizado:

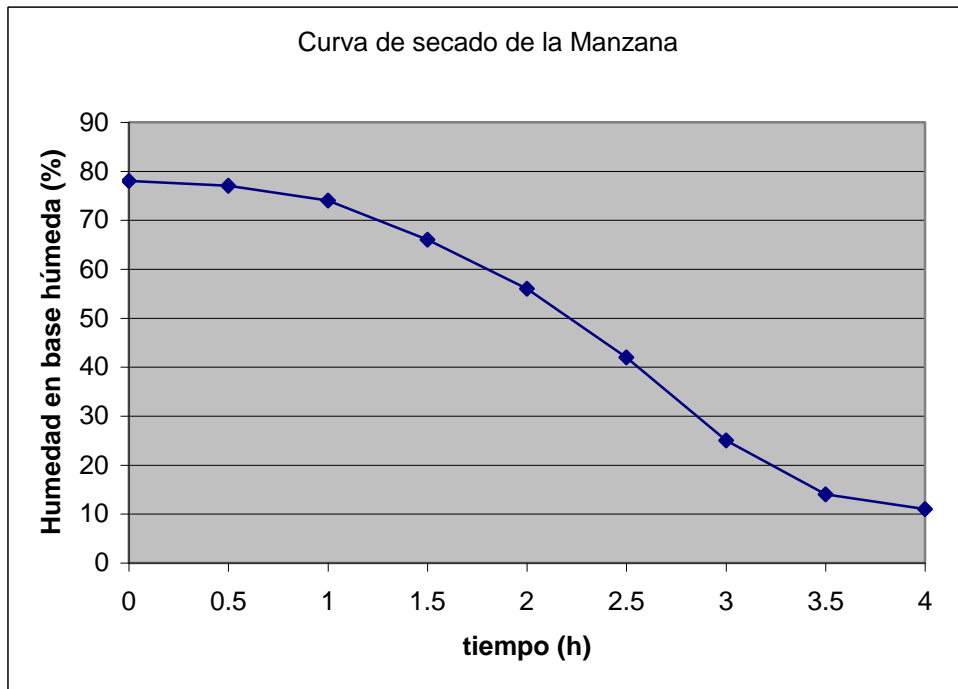


Figura 7.1. Curva de secado de la manzana

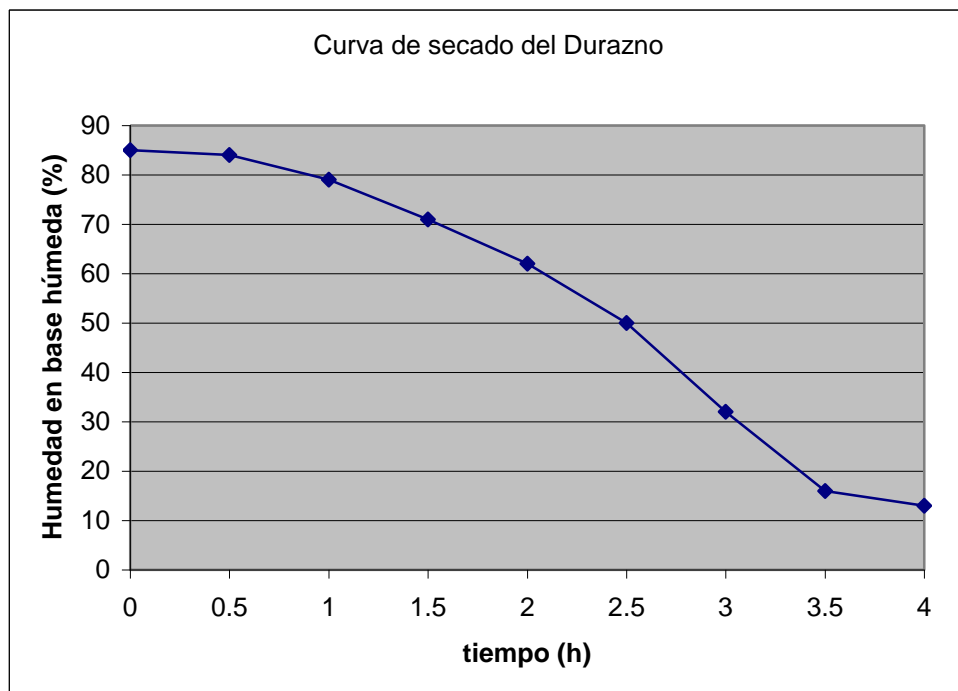


Figura 7.2. Curva de secado del durazno

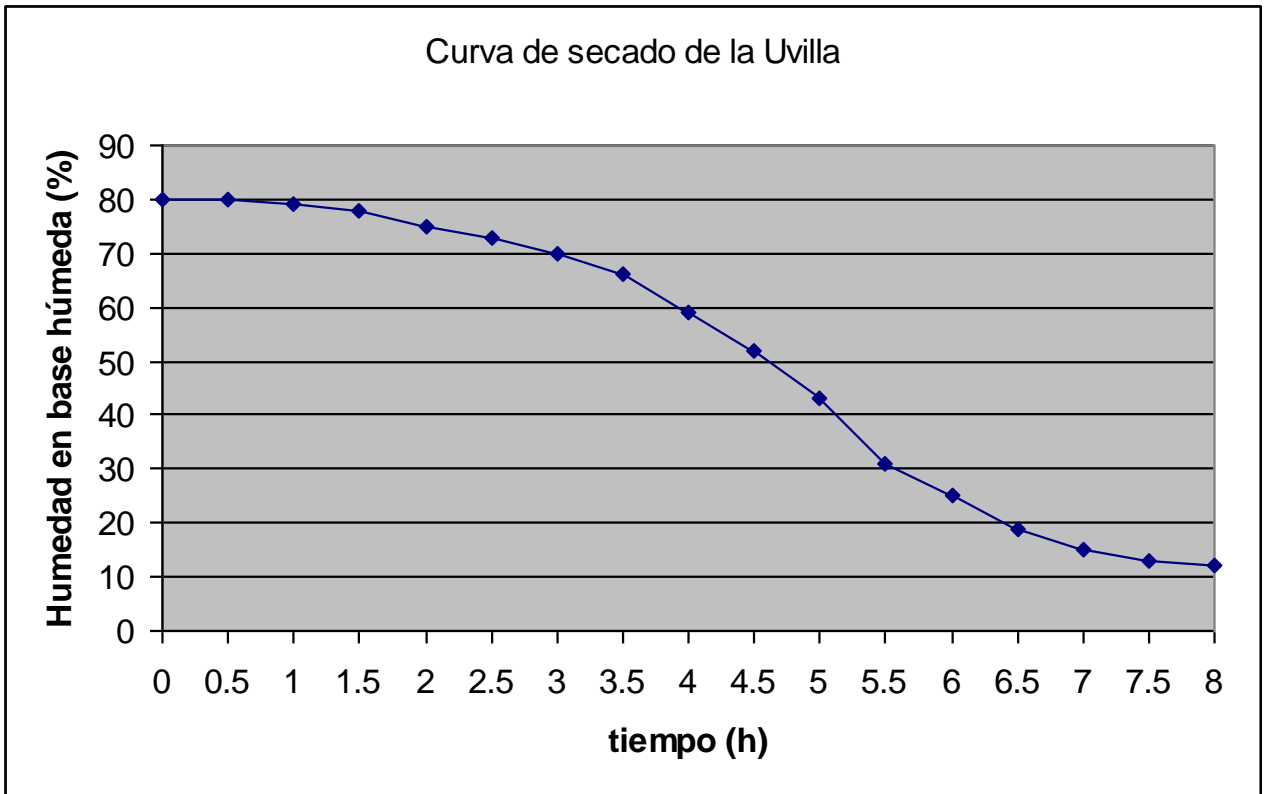


Figura 7.3. Curva de secado de la uvilla

El producto final ha tenido sabor y aroma muy buenos, su textura ha llegado a ser rugosa, un poco crujiente en ciertos casos, pero en general algo muy agradable para comer, lo cual nos indica que este horno nos ayudará a comercializar este tipo de frutas con un valor agregado que nos puede hacer más competitivos, no solo a nivel nacional sino también en el exterior.

CAPÍTULO 8

EVALUACIÓN ECONÓMICA – FINANCIERA

8.1 EVALUACIÓN ECONÓMICA

8.1.1 COSTOS DIRECTOS

En lo referente a costos de construcción del horno de secado se han considerado los rubros de materiales y mano de obra, los cuales detallamos en tablas de materiales a continuación:

a) Costos de estructura y recubrimiento

Tabla 8.1. Materiales de estructura y recubrimiento

Ítem	Material	Descripción	Cantidad	Costo Unitario [USD]	Costo Total [USD]
1	Plancha acero inoxidable	A304 (1.5 mm)	2	\$ 97,03	\$ 194,06
2	Tubo cuadrado estructural	6m (1" x 1mm)	2	\$ 6,50	\$ 13,00
3	Plancha tol galvanizado	1 mm	2	\$ 21,17	\$ 42,34
4	Kilo de electrodos acero inoxidable	AGA E-308-16	1	\$ 28,00	\$ 28,00
5	Kilo de electrodos	AGA 7018	5	\$ 2,20	\$ 11,00
6	Silicón transparente industrial	163 cc.	1	\$ 196,00	\$ 196,00
7	Pega Super Bonder Extra	5 gr.	1	\$ 2,67	\$ 2,67
8	Remaches pop	3/16" x 1/2"	100	\$ 0,03	\$ 3,00
9	Empaque de horno	1m	2	\$ 4,00	\$ 8,00

10	Protector filo grada negro	1m x 2cm	1	\$ 0,78	\$ 0,78
11	Barredera plástica negra	1m x 6cm	1	\$ 0,66	\$ 0,66
Tabla 8.1. Materiales de estructura y recubrimiento (continuación)					
12	Cadena Galvanizada	1/8" (1m)	1	\$ 0,92	\$ 0,92
13	Bisagras acero inoxidable	2"	2	\$ 1,18	\$ 2,36
14	Cierre cromado para vitrina o frigorífico	GLOBAL	1	\$ 10,00	\$ 10,00
15	Lana de vidrio	1" x 48" x 50"	2	\$ 42,85	\$ 85,70
16	Pintura Spray gris brillante	Envase	2	\$ 1,51	\$ 3,02
17	Regaton cuadrado	1 1/2"	8	\$ 0,14	\$ 1,12
18	Materiales varios	GLOBAL	1	\$ 10,00	\$ 10,00
				Subtotal	\$ 612,63
				IVA 12%	\$ 73,52
				Total	\$ 686,15

b) Costos de Bandejas

El siguiente material se utilizó para las bandejas que llevarán la fruta en el interior de la cámara:

Tabla 8.2. Materiales de construcción de bandejas

Item	Material	Descripción	Cantidad	Costo Unitario [USD]	Costo Total [USD]
1	Plancha de acero inoxidable	(0,4 mm)	1	\$44,56	\$44,56
2	Malla Tejida	1/6" x 1m x 1m	4	\$2,97	\$11,88
				Subtotal	\$56,44
				IVA 12%	\$6,77
				Total	\$63,21

c) Costo de accesorios y equipos del sistema de control

En la siguiente tabla podemos ver en detalle todos los accesorios utilizados, así como también todo el equipo de control:

Tabla 8.3. Accesorios y equipos de sistema de control

Item	Material	Descripción	Cantidad	Costo Unitario [USD]	Costo Total [USD]
1	Ventilador axial industrial Siemens 60010	800 CFM, 110 V, 1800 RPM	1	\$139,10	\$139,10
2	Controlador de temperatura Camsco	0 - 200 °C, 72x72	1	\$57,75	\$57,75
3	Termocupla con tornillo	0 - 500°C	1	\$13,40	\$13,40
4	Caja metálica liviana	72x72x100 mm	1	\$10,00	\$10,00
5	Extensión eléctrica	2x16 (1m)	3	\$0,67	\$2,01
6	Botonera Switch ON/OFF	3 x 10 AMP	1	\$2,63	\$2,63
7	Enchufe 3 patas (tierra)	120 V	1	\$1,34	\$1,34
8	Cable eléctrico negro	# 3x14	3	\$0,72	\$2,16
9	Taípe eléctrico negro	10 Y x 10 mm	1	\$0,26	\$0,26
10	Materiales varios	GLOBAL	1	\$10,00	\$10,00
				Subtotal	\$238,65
				IVA 12%	\$28,64
				Total	\$267,29

d) Costo de mano de obra

A continuación tenemos una tabla que resume el costo total de la mano de obra dividida en cuatro distintos rubros:

Tabla 8.4. Costo de mano de obra

Item	Proceso	Material	Cantidad	Costo Unitario [USD]	Costo Total [USD]
1	Construcción de estructura y recubrimiento	Acero inoxidable y tol negro	1	\$250,00	\$250,00
2	Construcción de bandejas	Acero inoxidable	4	\$25,00	\$100,00
3	Construcción de estructura metálica de soporte	Tubo de hierro	1	\$20,00	\$20,00
4	Instalación eléctrica y de equipos	GLOBAL	1	\$80,00	\$80,00
				Subtotal	\$450,00
				IVA 12%	\$54,00
				Total	\$504,00

En la siguiente tabla podemos ver resumido el total de Costos Directos del proyecto, una vez que se ha concluido con la construcción del horno:

Tabla 8.5. Total Costos Directos

Item	Descripción	Costo Total con IVA [USD]
1	Materiales estructura y recubrimiento	\$686,15
2	Materiales construcción de bandejas	\$63,21
3	Accesorios y equipos de sistema de control	\$267,29
4	Costo de mano de obra	\$504,00
TOTAL Costos Directos		\$1.520,65

8.1.2 COSTOS INDIRECTOS

Los costos indirectos, son gastos que no influyen directamente en el costo del horno, pero que son costos en que hemos tenido que incurrir para poder concluir este proyecto, y los detallamos a continuación:

Tabla 8.6. Total Costos Indirectos

Item	Descripción	Costo Total con IVA [USD]
1	Transportes	\$80,00
2	Pruebas	\$20,00
3	Varios	\$10,00
TOTAL SIN IVA		\$110,00
TOTAL Costos Indirectos		\$110,00

Estos valores sumados a los costos directos nos da una idea del costo que representa construir un horno de secado de frutas de similares características, tomando siempre en cuenta que a estos costos se les debe aumentar un aproximado de 10%, ya

que este horno fue construido en los laboratorios de la Escuela Politécnica del Ejército, y por lo tanto siempre que se quiera construir en un taller fuera de ésta, el costo va a ser un poco más alto.

8.1.3 IMPREVISTOS

En nuestro proyecto se tuvo un gran imprevisto, que fue el robo de ciertos materiales cuando se los transportaba hacia la universidad, y que tuvo una gran trascendencia en lo que se refiere a lo monetario, no tanto para el proyecto porque no se ha tomado este valor dentro de los costos reales de la construcción, sino para nosotros que tuvimos que afrontarlo, ya que estos materiales eran muy caros. Es por esto que nosotros recomendamos siempre tomar en cuenta un porcentaje de imprevistos que pueda cubrir cualquier inconveniente como este o cualquier otro que se tenga, y de ésta forma no se salga fuera del presupuesto asignado para un proyecto, cualquiera que éste sea.

El porcentaje recomendado para imprevistos está entre un 5% a un 10% dependiendo del monto del proyecto.

8.2 EVALUACION FINANCIERA

8.2.1 FUENTE DE FINANCIAMIENTO

La fuente de financiamiento de nuestro proyecto fue por una parte el CICTE a través de la generosa intermediación del Ing. José Guasumba, quienes auspiciaron desde el comienzo el impulso de nuestro proyecto, aportando básicamente con materiales para la construcción del mismo.

Por otra parte el financiamiento provino también de nosotros, los autores de ésta tesis, quienes tuvimos que aportar con la mayor parte del capital para compra de

materiales e instrumentos, y todos los otros gastos que se iban teniendo que afrontar a medida que avanzaba el proyecto.

8.2.2 VALOR ACTUAL NETO (VAN)

El Valor Actual Neto (VAN) de un proyecto, es su valor medido en dinero de hoy, es decir el equivalente de dólares actuales de todos los ingresos y egresos, presentes y futuros que constituyen el proyecto.

Para cálculo del VAN es necesario obtener el flujo de caja neto para el tiempo en el que se estima recuperar la inversión. Por el monto invertido en el proyecto nosotros esperamos que la inversión se pueda recuperar en 2 años, por lo que realizaremos los cálculos en función de esto.

Además todos los análisis los realizaremos para el durazno porque éste es el que mayor porcentaje de humedad tiene con un 84% de humedad, por lo que obtendremos un menor peso de producto deshidratado por cada carga.

Primero analizaremos la producción estimada en un año, tomando en cuenta que para empezar durante el primero y segundo año sólo se realizará la deshidratación de una carga de fruta por semana, es decir de 55 Kg. de producto:

Tabla 8.7. Producción anual estimada

Trabajo por semana	1	Vez
Carga de producto fresco semanal	55	Kg/Carga
Producto deshidratado estimado	8,8	Kg/Semana
Número de semanas al año	52	Semanas
TOTAL carga de fruta deshidratada en el año.	457,6	Kg/Año

Esto quiere decir que en el año tendremos un total de producción de fruta deshidratada de 457,6 [Kg/Año], sin realizar más que una carga para deshidratación de fruta a la semana.

a) Preparación de la fruta

Para la preparación de la fruta vamos a necesitar personal para pelar y cortar rodajas de las frutas, por lo que pasaremos directamente al costo de mano de obra, ya que el costo de materiales es relativamente insignificante, ya que serían solamente un juego de cuchillos o peladores y rayadores para sacar rodajas, que amortizados para todo el año no representan un valor como para tomar en cuenta.

b) Mano de obra

Para el costo de mano de obra tomaremos como base tres personas que trabajen en cada carga, cada una con el sueldo básico de \$150 dólares al mes, que si tomamos en cuenta que son 22 días laborables y cada día de 8 horas de trabajo nos da un valor de 0,85 dólares por hora de trabajo.

Tabla 8.8. Costos mano de obra por carga

Sueldo básico por persona	0,85	\$ / Hora
Número de trabajadores	3	Personas
Tiempo pelando frutas	3	Horas
Tiempo de carga en bandejas	0,5	Horas
Tiempo en vaciar bandejas	0,5	Horas
Tiempo de empaque	2	Horas
Tiempos perdidos	1	Horas
TIEMPO TOTAL DE PREPARACIÓN	7	Horas
Costo de mano de obra por carga	17,85	\$ / Carga
Costo mano de obra por Kg. seco	2,03	\$ / Kg.Seco

Entonces, el costo de mano de obra por cada carga es de \$17,85 dólares, pero como estamos trabajando en función del total de fruta deshidratada en el año, entonces dividimos este costo para el peso de fruta deshidratada por cada carga, y así obtenemos un costo de \$2,03 dólares por Kg. de fruta seca.

c) Consumo de energía eléctrica

Para éste análisis tomamos datos de los fabricantes del ventilador y del sistema de control, de cuánto consumen en KW por hora, tomando en cuenta además que el sistema permanece el 80% del tiempo de secado encendido, y es así que obtuvimos la siguiente tabla de costos:

Tabla 8.9. Costos consumo energía eléctrica

Dos lámparas de 60 Watts	0,12	KW
Consumo del ventilador y control	0,1	KW
Total consumo eléctrico por hora	0,22	KW
Tiempo total del ciclo de secado	15	Horas
Frecuencia de encendido en ciclo	80%	
Total consumo eléctrico	2,64	KWh
Costo energía por KWh	0,095	\$/KWh
TOTAL COSTO ENERGÍA ELEC.	0,2508	\$/carga

d) Biomasa

El calentamiento del aire lo realizamos mediante la combustión de combustibles vegetales, específicamente de cascarilla de arroz, por lo que debemos tomar en cuenta también el costo que representa el gasto de la cascarilla para cada carga.

En base a las pruebas realizadas con el horno, pudimos obtener los siguientes datos:

- Un saco de cascarilla de arroz cuesta \$2,00 dólares
- El saco es suficiente para realizar dos cargas, en el caso de la uvilla que se debe secar por más tiempo que la manzana y el durazno.
- En el caso de la manzana y el durazno nos alcanza para 4 cargas.
- Por lo tanto tomaremos como promedio 3 cargas.

$$\text{TOTAL} = \$2,00 / 3 \text{ CARGAS}$$

$$\text{TOTAL} = \$0,70 \text{ (dólares x carga)}$$

e) Empaque

Aproximadamente el costo de la empaquetadura del producto seco será de unos **\$0,15 dólares por cada Kilo.**

f) Costo total de producción por kilo de producto seco

Si sumamos todos los costos que hemos detallado anteriormente obtenemos que el costo total de producción por carga de producto es de **\$18,95 dólares por carga**, es decir que el costo de producción por kilo de producto seco es de:

$$\text{TOTAL} = \$18.95 / 8,8 \text{ Kg. Seco x carga}$$

$\text{TOTAL} = \$2,1534 \text{ (Dólares por Kg. de producto deshidratado)}$
--

g) Flujo de Caja

Debido a la dolarización en que vivimos en nuestro país, la economía se ha vuelto mucho mas estable, y por lo tanto casi no existe inflación, por lo que si estamos calculando el flujo de caja para 2 años en los que se espera recuperar la inversión, tendremos que mantener los costos de compra y venta de producto en nuestros cálculos a dos años. El cálculo de flujo de caja lo haremos para 1 año ya que el segundo año será igual que el primero.

De las tres frutas el más caro es el durazno, por lo que está bien que sigamos trabajando en función de éste, el cual podemos encontrar a nivel de mayorista a un precio aproximado de \$0,82 dólares el Kilo.

Sabemos que de 1 Kg. de fruta podemos sacar aproximadamente el 16% de su peso en el producto ya deshidratado, por lo que 1 kg. de producto deshidratado en realidad tendría un costo de \$5,125 dólares x Kg. Si a esto le sumamos el costo de producción por Kg. de producto deshidratado obtenemos un valor de:

$$\text{TOTAL} = \$5,125 + \$2,1534$$

$$\text{TOTAL} = \$7,28 \text{ (dólares x Kg. de producto deshidratado)}$$

Si a esto le aumentamos un 25% de utilidad entonces tendremos un costo para la venta de producto deshidratado de:

$\text{TOTAL} = \$9,10 \text{ (dólares / Kg. deshidratado para la venta)}$
--

Entonces para desarrollar el flujo de caja tomaremos en cuenta que la recuperación del capital invertido será en 1 año, y que la venta total en el año será lo estimado de producción en el año en Kg. por valor de Kg. deshidratado.

Ingresos:

- Venta de producto: 457,6 Kg. x \$9,10 dólares / Kg. = **\$4.164,16**

TOTAL INGRESOS = \$4.164,16

Egresos:

- Costos de producción: 457,6 Kg. x \$2,1534 dólares / Kg. = **\$985,40**
- Gastos Administrativos: 10% de Producción = **\$ 98,54**
- Gastos Financieros (préstamos, etc.): 10% de Producción = **\$98,54**
- Gastos Ventas (comisiones, dep. de ventas): 15% Producción = **\$147,81**

TOTAL EGRESOS = \$1.330,29

Utilidad:

TOTAL INGRESOS – TOTAL EGRESOS

UTILIDAD = \$2.833,87

Impuestos:

- Trabajadores: 15% de la Utilidad = **\$425.10**

- Impuesto a la Renta: 25% Utilidad después de trabajadores = **\$602,19**

UTILIDAD NETA = \$1.806,58

Entonces, una vez que hemos obtenido la utilidad neta o flujo neto, podemos calcular el valor del VAN en base a la siguiente fórmula:

$$VAN = \frac{F_{neto}}{(1+i)^n} \quad (8.1)$$

En donde:

VAN : Valor actual neto

F_{neto} : Flujo neto

i : Interés

n : número de años

Hay que tomar en cuenta que la tasa de interés de oportunidad i es de $i=20\%$ anual.

El criterio de decisión con respecto al VAN dice que el proyecto planteado es aconsejable cuando el VAN es mayor que cero, es indiferente cuando el VAN es igual a cero y no es aconsejable cuando el VAN es menor que cero, siempre y cuando el VAN se haya calculado utilizando la tasa de interés de oportunidad.

Es decir, que en resumen, si calculamos el VAN en función de la tasa de interés de oportunidad i , tenemos lo siguiente:

- $VAN(i) > 0$ el proyecto es conveniente.
- $VAN(i) = 0$ el proyecto es indiferente.
- $VAN(i) < 0$ el proyecto no es atractivo.

Pero también podemos calcular el VAN como índice para evaluar la bondad económica de los proyectos de inversión, en cuyo caso se calcula en función de una tasa de interés que nos parezca conveniente, y así obtenemos los siguientes criterios:

- Si el $VAN(i^*) > 0$ nos indica que el dinero invertido en el proyecto rinde más del interés i^* .
- Si el $VAN(i^*) = 0$ el dinero invertido en el proyecto rinde exactamente el interés i^* .
- Si el $VAN(i^*) < 0$ nos indica que el dinero invertido nos rinde menos que el interés i^* .

Para este caso tenemos que tomar en cuenta que un interés que valga la pena para invertir en un proyecto, debe ser mayor que el interés que nos pagaría un banco, que aproximadamente se encuentra entre el 4% y el 6% dependiendo del tipo de inversión.

Tabla 8.10. Valor Actual Neto ($i=20\%$)

AÑO	FLUJO NETO	VAN
0	-\$1.630,65	-\$1.630,65
1	\$1.806,58	\$1.505,48
2	\$1.806,58	\$1.254,57
		\$1.129,40

Como el VAN es mayor que 0, quiere decir que el proyecto es conveniente, ya que la inversión se recupera en menos de 2 años, por lo que vale la pena continuar con el proyecto y la producción de fruta deshidratada.

Ahora, para evaluar si el proyecto es económicamente rentable tomaremos una tasa de interés de 25% para el rendimiento anual, lo que nos da:

Tabla 8.11. Valor Actual Neto ($i^*=25\%$)

AÑO	FLUJO NETO	VAN
0	-\$1.630,65	-\$1.630,65
1	\$1.806,58	\$1.445,26
2	\$1.806,58	\$1.156,21
		\$970,83

Entonces como podemos ver que el dinero invertido en este proyecto nos va a rendir más que el 25%, lo que hace muy atractivo invertir en este tipo de proyectos. Pero a pesar de esto, el índice más utilizado para medir la rentabilidad de un proyecto es el TIR por lo que continuaremos con el cálculo de éste.

8.2.3 TASA INTERNA DE RETORNO (TIR)

Existe un procedimiento correcto para el cálculo de la rentabilidad que se produce al invertir en un proyecto, éste método se llama Tasa Interna de Retorno (TIR) o rentabilidad. Para poder calcular esto es necesario tener cuenta los siguientes parámetros:

- Todos los ingresos y egresos que aparecen en el proyecto de inversión.
- El valor relativo del dinero con el tiempo.
- La tasa de interés de equivalencias o de oportunidad, cuando se comparan cantidades que aparecen en momentos diferentes.
- El valor del $VAN(i) = 0$.

En la tabla del cálculo del VAN probamos el interés necesario para que el VAN se acerque lo más posible a cero y es así que obtenemos:

Tabla 8.12. Tasa interna de retorno ($i^*=74,34\%$)

AÑO	FLUJO NETO	VAN
0	-\$1.630,65	-\$1.630,65
1	\$1.806,58	\$1.036,24
2	\$1.806,58	\$594,38

Entonces obtenemos que la Tasa Interna de Retorno (TIR) es del 74,34%, lo que nos demuestra que efectivamente es muy atractivo invertir en este tipo de proyectos.

8.2.4 RELACIÓN COSTO BENEFICIO

La relación costo beneficio (C/B) se calcula en base a analizar los siguientes procedimientos:

- Calcular el valor presente de los ingresos asociados con el proyecto.
- Calcular el valor presente de los egresos del proyecto.
- Se establece una relación entre el VAN de los ingresos y el VAN de los egresos, al dividir el primero para el segundo respectivamente.
- Tomar en cuenta que la relación C/B es una función del interés, de modo que se recomienda que, para cálculos decisorios, se utilice el la tasa de interés de oportunidad.

$$\frac{C}{B}(i) = \frac{VAN \text{ ingresos } (i)}{VAN \text{ egresos } (i)} \quad (8.2)$$

La relación costo beneficio nos puede dar las siguientes pautas para la toma de decisiones:

- Si la relación C/B (i) > 1, nos indica que el VAN de lo ingresos es mayor que el Van de los egresos, por lo que se puede decir que el proyecto es atractivo.
- Si la relación C/B (i) = 1, sabemos que el VAN de los ingresos es igual al VAN de los egresos, por lo que, al aplicar el VAN a todo el proyecto en conjunto vamos a obtener un valor negativo, que nos dice que el proyecto no es atractivo.

- Si la relación C/B (i) < 1, nos dice directamente que el proyecto no es nada atractivo y que no vale la pena invertir en él.

Tabla 8.13. Relación Costo-Beneficio (C/B) (i=20%)

AÑO	INGRESOS	EGRESOS	VAN Ingresos	VAN Egresos
0	\$ 0,00	\$ 1.630,65	\$ 0,00	\$ 1.630,65
1	\$ 4.164,16	\$ 1.330,29	\$ 3.470,13	\$ 1.108,58
2	\$ 4.164,16	\$ 1.330,29	\$ 2.891,78	\$ 923,81
			\$ 6.361,91	\$ 3.663,04

Es decir que la relación C/B (i) = 1,73, por lo que ahora si concluimos que el proyecto definitivamente es atractivo.

CAPÍTULO 9

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

9.1 CONCLUSIONES

- El horno tuvo un comportamiento muy satisfactorio, es decir que todos sus componentes, sistema de control, intercambiador calor, ventilador y en si la propia cámara de secado, se comportaron de la manera esperada, por lo que se pudo obtener el producto deseado.
- La fruta mantuvo sus propiedades, como son el color, sabor textura y aroma, en aproximadamente un 80%.
- Se pudo observar que al meter las frutas en agua por lo menos una hora, éstas recuperaban sus características iniciales, por lo que se comprueba que los procesos de las pruebas de funcionamiento estuvieron correctos.
- Para el caso de la uvilla, el tiempo total de secado varió aproximadamente en un 15% más del estimado teóricamente, esto debido a distintos factores que afectan en la práctica. Sin embargo, en el caso de la manzana y durazno, los tiempos calculados no varían más allá de un 3% con los obtenidos en la práctica.
- Se pudo comprobar que las bandejas superiores estaban más calientes que las inferiores durante el proceso, por lo que notamos que la distribución del aire dentro de la cámara no es homogénea, a pesar de que éste ingresa por la parte inferior de la misma.
- Después del análisis económico y financiero, podemos concluir que éste es un proyecto rentable y que es una inversión muy atractiva, ya que se comprobó que

este proyecto nos podría rendir más que el 25%, y la Tasa Interna de Retorno sería de un 74,34%.

- No se obtuvo condensación en las paredes internas del horno, debido a que el aislamiento térmico de las paredes, colocado con la intención de reducir las pérdidas al mínimo, no permite que la temperatura de las mismas baje hasta el punto de rocío. A pesar de esto, se mantuvo el diseño inclinado del horno para permitir la salida del agua producida por la deshidratación de la fruta, y para facilitar de limpieza de la cámara.
- Al comparar nuestros resultados con los de hornos convencionales hemos podido comprobar lo siguiente:
 - Los tiempos de secado de la fruta se reducen considerablemente.
 - A pesar de ser más costosa la construcción e implementación de nuestro sistema de calefacción, al final es un ahorro tremendo en los costos de funcionamiento, ya que los hornos convencionales utilizan resistencias eléctricas que tienen un gran consumo de energía eléctrica, mientras que el consumo en el nuestro es realmente despreciable.
 - Al ser inclinado, todo el agua que se produzca dentro de la cámara va a salir por un desfogue, por lo que relacionado con hornos convencionales, éste pierde menos energía en calentar esa agua producida.
 - Por la distribución de las paredes, tiende a distribuir mejor el flujo de aire con respecto a los hornos rectangulares, y se acerca a la de los hornos cilíndricos.
- Podemos ver que no es muy difícil darle un valor agregado a la fruta, lo cual nos hace más competitivos, no solo a nivel nacional, sino también en el extranjero, ya que al deshidratar la fruta ésta durará mas tiempo sin dañarse, y además el simple hecho de que esté en una diferente presentación ya la hace más atractiva.

9.2 RECOMENDACIONES

- Rotar la posición de las bandejas cada cierto tiempo, tratando de que las cuatro bandejas pasen por las cuatro posiciones, para lograr de esta forma un secado más uniforme de la fruta, procurando tener la puerta del horno el menor tiempo posible abierta para no perder tanta energía.
- Emplear materiales de acero inoxidable en todos los elementos del interior de la cámara, para evitar contaminación de la fruta, y para hacer que ésta sea más resistente a cualquier variación de temperatura o presión durante el proceso.
- Utilizar sistemas de calefacción que nos ahorren costos de producción y que sean más eficientes.
- Automatizar más el sistema de control para obtener productos de mejor calidad.
- Manipular la fruta con guantes, lavar con agua potable, pelar y cortar con cuchillos plásticos, para evitar cualquier contaminación de la misma.
- Se recomienda la inmersión de la fruta en ácido ascórbico para evitar el oscurecimiento de ésta al deshidratarla.
- Empacar al vacío si lo que se quiere es exportar la fruta deshidratada, ya que de ésta manera se puede conservar fresca por más tiempo y se puede garantizar su calidad al momento de consumirla.

BIBLIOGRAFÍA

Cengel Yunus y Boles Michael, Termodinámica, Tomo I y II, 2da ed. México, McGraw-Hill 2000

Desrosier., N.W. 1963 "The Technology of Food Preservation" AVI Publishing Co., Westport, Conn., 1976

Enciclopedia de Química Industrial de Ulman. Tomo I.

FAO, Prevention of Post-Harvest Food Losses: A Training. Manual. Roma, UNFAO, 1985.

Fuller, Solar Drying of Horticultural Produce: Present Practice and Future Prospects. Postharvest News and Information 4 (5): 131N-126N, 1993.

Incropera Frank y de Witt, Fundamentos de transferencia de calor, 4ta ed, México, Prentice Hall, 1999.

Hanlon, J.F. Handbook of Package Engineering, TS 195 H35, 1998.

Ing. Pedro Fernández, Manual de Operaciones Industriales, Cáp. 5.

Joslyn., M.A, Food Processing by Drying and Dehydration". Vol.2 AVI Publishing Co., Westport. Conn, 1963.

Perry, Robert, Manual del Ing. Químico. 5ta Ed.

Potter., N.N, "La Ciencia de los Alimentos". 2 Edición. Edutex. S.A. México 13 D.F., 1978.

Revista 30 Días, Córdoba Argentina, Septiembre 2004.

Revista Facultad de Ingeniería U.T.A., Chile, Vol.4, 1997.

Singh, R.P., Heldman, D.R. Introduction to Food Engineering, 2nd edition, Academic Press, 1993.

Toledo, R. T. Fundamentals of Food Process Engineering. 2nd. Edition, Van Nostrand-Reinhold, 1991.

USDA, Canning, Freezing and Storing Garden Produce. USDA Agricultural Information Bulletin 410, 1977.

Referencias de Internet:

<http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4070035/index.html>

<http://www.extractores.com.mx/index.htm>

ANEXOS

ANEXOS A
PLANOS DEL HORNO DE SECADO DE FRUTAS

ANEXOS B
MANUAL DE OPERACIÓN Y
MANTENIMIENTO DEL EQUIPO

MANUAL DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DEL EQUIPO

A continuación describiremos como se debe operar el equipo y cual debe ser su mantenimiento:

A) Operación

Para la operación del equipo se deben seguir los siguientes pasos, lo cuál nos garantizará el correcto funcionamiento del mismo:

1. Verificar el estado de todas las partes y piezas que conforman el conjunto del horno para secado de frutas.
 - Revisar estructura soporte, soldaduras, estado de las paredes externas e internas del horno, estado del venterol y del ventilador axial y en general que todo el equipo se encuentre en perfecto estado y que no existan fallas que puedan afectar el funcionamiento del equipo.
2. Examinar que no existan elementos extraños dentro de la cámara del horno ni del conjunto del intercambiador de calor y ventilador.
3. Familiarizarse con el equipo y el sistema de control.
4. Conectar el equipo a la red de corriente eléctrica.
5. Encender la cámara de combustión.
 - Es recomendable poner un trapo con diesel en el contorno de la cámara de combustión para que ayude a formar una pequeña cama de cascarilla quemada para un buen funcionamiento de la misma.
 - Alimentar constantemente la cámara con cascarilla para mantenerla bien encendida durante todo el proceso.

6. Conectar y encender el venterol que da flujo de aire a la cámara de combustión.
 - El venterol tiene un regulador de flujo de aire que se puede utilizar para regular y mejorar la combustión de la biomasa.
7. Encender el sistema de control del horno.
 - En la parte inferior derecha de la puerta del horno existe una botonera switch ON/OFF, se debe apretar el botón ON.
8. Precalentar el horno a 40°C.
9. Colocar las bandejas con el producto dentro de la cámara de secado.
 - Seleccionar bien el producto.
 - Pelarlo y cortarlo en rodajas (depende del producto)
 - Colocar la fruta en las bandejas con un máximo de factor d carga dependiendo del producto (En la uvilla Factor de Carga = 1,5)
10. Programar el sistema de control a la temperatura máxima recomendada para el secado, según el tipo de producto que se vaya a secar.
11. Tomar el tiempo para apagar el equipo en el tiempo recomendado para secado de cada producto.
12. Cambiar de posición las bandejas cada $\frac{1}{4}$ del tiempo total de secado, tratando de que todas pasen por una posición diferente cada vez y procurando no abrir por mucho tiempo la puerta para que el horno no se enfríe y que no ingrese humedad que pueda afectar al producto (utilizar guantes porque las bandejas están muy calientes).

13. Verificar el estado del producto antes de llegar al tiempo recomendado, para poder dejarlo mas o menos tiempo de ser necesario.
14. Concluido el tiempo y una vez verificado que el estado del producto sea el adecuado, apagar el equipo de la botonera switch ON/OFF.
15. Abrir la puerta del horno y sacar las bandejas, utilizando guantes porque salen muy calientes.
16. Apagar el venterol y desconectarlo.
17. Apagar la cámara de combustión y desconectar el equipo.
18. Limpiar cámara de secado, cámara de combustión y bandejas.

B) Mantenimiento

Es necesario dar un buen mantenimiento constantemente al equipo para que no se deteriore y mantenga un buen funcionamiento, por lo que se recomienda lo siguiente:

- Bandejas:

1. Evitar golpearlas.
2. Limpiarlas después de cada uso, con detergente y agua.
3. De ser necesario volver a soldar partes que se han desoldado.
4. Evitar cargar demasiado las bandejas para que no sufran deformaciones.

- Cámara:

1. Evitar golpear las paredes.
2. Limpiar todas las paredes y puerta después de cada uso, con detergente y agua.
3. Lubricar bisagras y cierre cada 6 meses.
4. Verificar soldaduras y de ser necesario soldar partes desoldadas.

- Partes eléctricas:

1. Limpiar el polvo en todas las piezas y partes eléctricas.
2. Ajustar periódicamente los tornillos de todas las conexiones.
3. Revisar estado de los cables periódicamente y de ser necesario reemplazarlos por uno similar.

- Ventilador:

El mantenimiento del ventilador se lo debe realizar de acuerdo a las recomendaciones del fabricante.

- Acoples:

1. Ajustar periódicamente los pernos de los acoples.
2. Verificar soldaduras y de ser necesario volver a soldar.

ANEXOS C
FOTOGRAFÍAS DEL EQUIPO



Foto 1: Horno, soporte e intercambiador de calor (vista lateral).

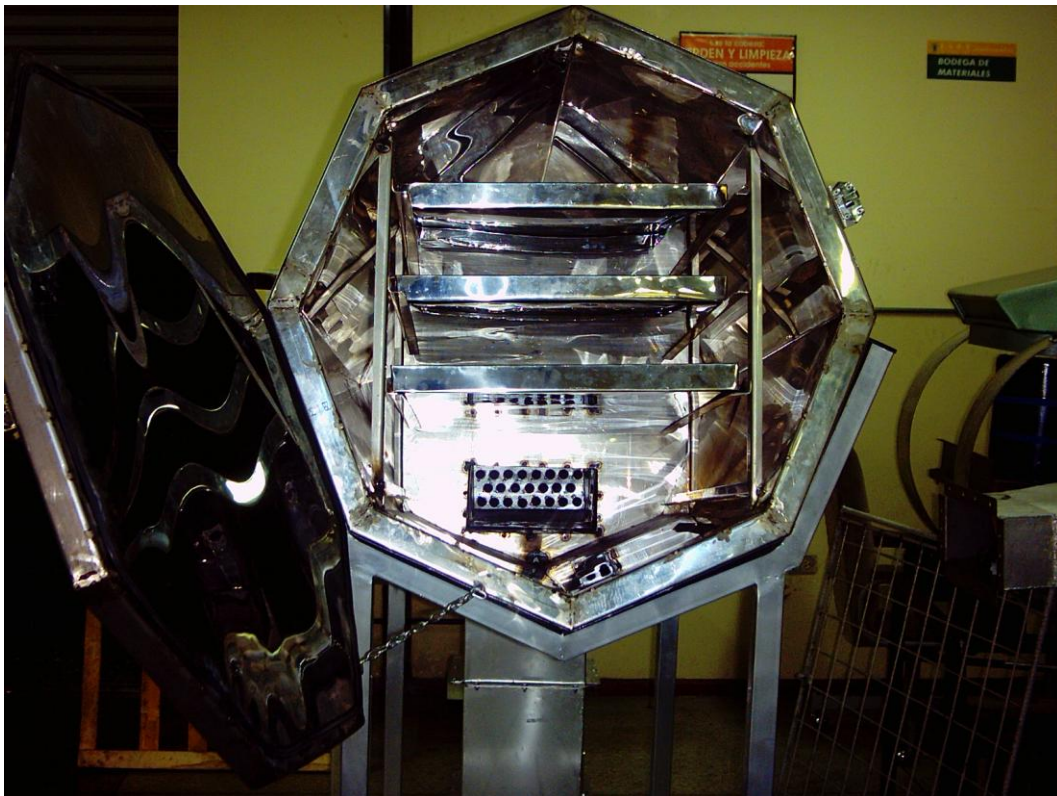


Foto 2: Vista del interior del horno (bandejas, bastidor y entrada de aire).

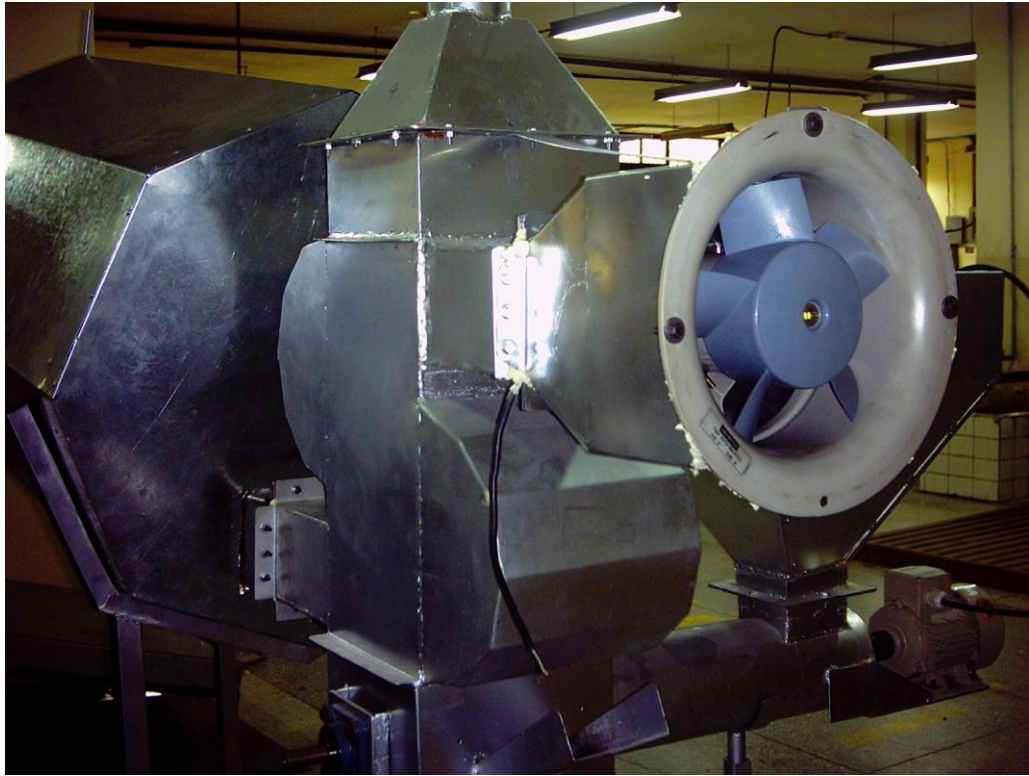


Foto 3: Vista posterior (intercambiador de calor y ventilador).

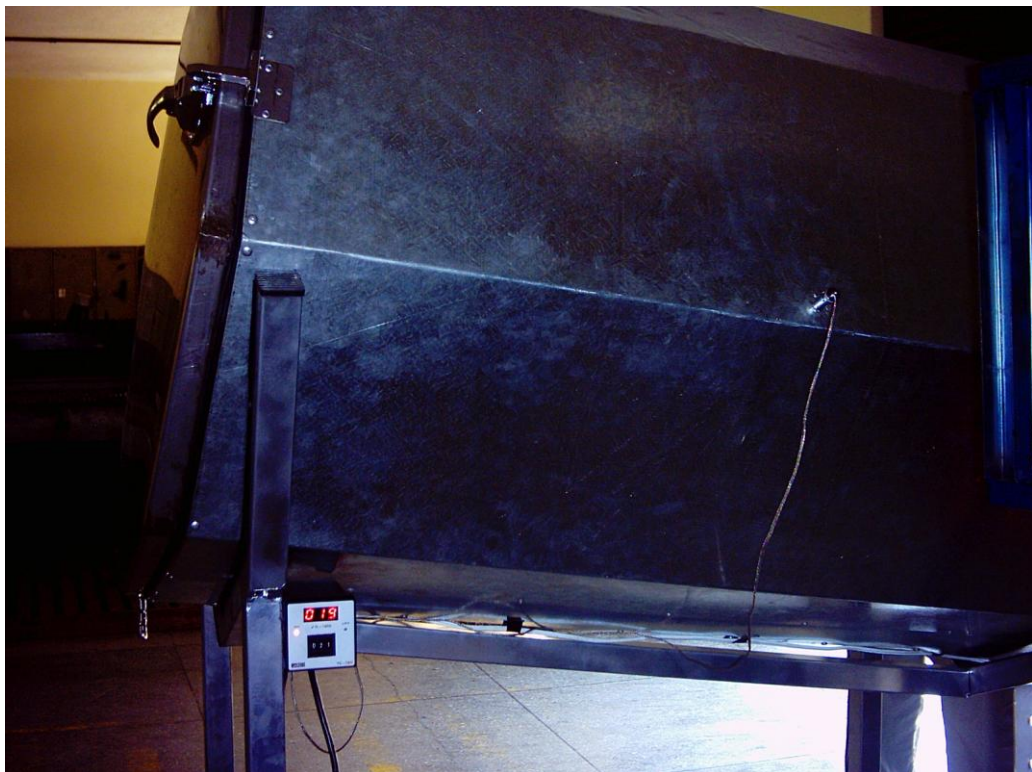


Foto 4: Vista lateral (control de temperatura y termocupla).

ANEXOS D
FOTOGRAFÍAS DE LOS PRODUCTOS



Foto 5: Muestras de durazno deshidratado.



Foto 6: Muestras de manzana deshidratada.

ANEXOS E
SELECCIÓN Y HOJA TÉCNICA DEL VENTILADOR

ANEXOS F
TABLAS DE PROPIEDADES

ANEXOS G
DISEÑO DE ESTRUCTURA SOPORTE