

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SECADOR DE ALIMENTOS DE ORIGEN VEGETAL EN EL ESTADO AMAZONAS

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de
Venezuela
Por los bachilleres:
Bermúdez Fermín, Jorge Luis
Maiz Erices, Vander
para optar al Título
De Ingeniero Mecánico

Caracas, 2004

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SECADOR DE ALIMENTOS DE ORIGEN VEGETAL EN EL ESTADO AMAZONAS

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Fausto Carpentiero

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de
Venezuela
Por los bachilleres:
Bermúdez Fermín, Jorge Luis
Maiz Erices, Vander
para optar al Título
De Ingeniero Mecánico

Caracas, 2004

Bermúdez F, Jorge L /y/ Maiz E, Vander

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SECADOR DE
ALIMENTOS DE ORIGEN VEGETAL EN EL ESTADO
AMAZONAS**

**Tutor Académico: Prof. Fausto Carpentiero
Tesis. Caracas. U.C.V. Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica. 2004. 108 pág.**

Palabras Claves: Secado, Alimento Vegetal, Diseño, Máquina

En el presente trabajo enmarcado dentro del área de procesamiento de alimentos se realizó un estudio de posibles soluciones a un problema planteado por las comunidades rurales del Estado Amazonas, en el cual se diseñó y construyó un secador de alimento de origen vegetal para esta zona. Se presentaron las distintas opciones y se seleccionó la opción más factible para la solución del problema por medio de métodos de diseño como lo son la tormenta de ideas, análisis morfológico, etc.

Una vez determinado el sistema, se procedió a diseñar o seleccionar cada uno de los componentes que conforman la máquina. A partir de esto, y con el conocimiento de los sistemas a emplearse, se construyó un prototipo y se planteó el mantenimiento del mismo, con el cual se deben regir los beneficiados de la misma.

Para demostrar la efectividad del equipo, se elaboraron curvas de secado bajo condiciones experimentales de temperatura y humedad presente en la zona, a través de las cuales se evidenció el uso de dicha máquina para el secado de alimento vegetal.

Caracas, junio de 2004

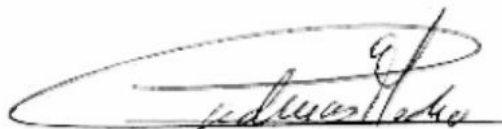
Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por los Bachilleres, Bermúdez F. Jorge y Maiz E. Vander, titulado:

"DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SECADOR DE ALIMENTOS DE ORIGEN VEGETAL EN EL ESTADO AMAZONAS".

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Mecánico.



Prof. Julio Segura
Jurado



Prof. Pedro Cadenas
Jurado



Tutor Académico

DEDICATORIA

A mis padres, por su apoyo y comprensión a todo lo largo de mi carrera, a ellos les dedico este trabajo.

También a mis hermanos y resto de mi familia les dedico esto.

Vander.

A mi papá Verquis, a mi mamá Gladis, a mi mami Teresita, a mi tío Rafael y a mi padrino Blanco.

Jorge.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, a nuestros padres, hermanos, amigos y demás personas que de una manera u otra estuvieron apoyándonos durante la realización de este trabajo de grado.

A nuestro tutor y al personal de FUDECI que colaboró con nosotros.

A nuestras familias.

A la familia Rossetti.

Gracias.

INDICE GENERAL

CAPITULO I **INTRODUCCIÓN**

1.1 ANTECEDENTES	2
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.3 OBJETIVOS	3
<i>1.3.1 OBJETIVO GENERAL</i>	3
<i>1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS</i>	4
1.4 LIMITACIONES	4
1.5 FUDECI	5
<i>1.5.1 VISIÓN DE FUDECI</i>	5
<i>1.5.2 MISIÓN DE FUDECI</i>	5
<i>1.5.3 UBICACIÓN</i>	6

CAPITULO II **MARCO TEÓRICO**

2.1 PRINCIPIOS DE SECADO	7
<i>2.1.1 MÉTODOS DE SECADO</i>	8
<i>2.1.2 CONCEPTOS BÁSICOS</i>	9
2.2 ENCOSTRAMIENTO Y EMPARDEAMIENTO	12
2.3 VELOCIDAD DE SECADO	13

2.4	TIEMPO DE SECADO	20
2.5	CIRCULACIÓN DE AIRE	22
2.5.1	<i>DIRECCIÓN DEL FLUJO AIRE RESPECTO A LA SUPERFICIE DE SECADO</i>	23
2.5.1.1	FLUJO PARALELO	23
2.5.1.2	FLUJO PERPENDICULAR	24
2.5.1.3	FLUJO A TRAVÉS	25
2.5.2	<i>DIRECCIÓN DEL FLUJO DE AIRE RESPECTO AL MOVIMIENTO DEL MATERIAL</i>	25
2.5.2.1	FLUJO EN CONTRACORRIENTE	25
2.5.2.2	FLUJO CONCURRENTES	26
2.5.2.3	FLUJO CRUZADO	27
2.6	MÉTODOS DE SECADO PARA ALIMENTOS	27
2.6.1	<i>MÉTODOS DIRECTOS</i>	27
2.6.2	<i>MÉTODOS INDIRECTOS</i>	28
2.7	SELECCIÓN DEL MÉTODO DE SECADO	29
2.8	TIPOS DE SECADORES	31
2.8.1	<i>SECADORES ROTATIVOS</i>	31
2.8.2	<i>SECADORES DE RODILLO</i>	32
2.8.3	<i>SECADORES DE COMPARTIMENTOS, BANDEJAS O CABINA</i>	33
2.8.4	<i>SECADORES DE TÚNEL</i>	34
2.8.5	<i>SECADORES DE CINTAS TRANSPORTADORAS</i>	35
2.8.6	<i>SECADORES DE LECHO FLUIDIZADO</i>	36
2.8.7	<i>SECADORES DE SPRAY</i>	37

2.9 FORMA DE OPERACIÓN	38
2.10 PSICROMETRÍA	38
2.10.1 PROPIEDADES TERMODINÁMICAS DEL AIRE HUMEDO	39
2.10.1.1 HUMEDAD RELATIVA	39
2.10.1.2 TEMPERATURA DE BULBO SECO	39
2.10.1.3 TEMPERATURA DE BULBO HÚMEDO	39
2.10.1.4 PRESIÓN DE VAPOR	40
2.10.1.5 ENTALPÍA	40
2.10.1.6 VOLÚMEN ESPECÍFICO	40
2.10.2 CARTA PSICROMÉTRICA	40
2.11 TRANSFERENCIA DE CALOR	41
2.11.1 CONDUCCIÓN	42
2.11.2 CONVECCIÓN	42
2.11.3 RADIACIÓN	43
2.12 EL ALIMENTO	43
 <u>CAPÍTULO III</u>	
MARCO METODOLÓGICO	
3.1 METODOLOGÍA DEL DISEÑO	45
3.2 CLARIFICACIÓN DE LA TAREA	45
3.3 RESTRICCIONES PRELIMINARES	45
3.4 TORMENTA DE IDEAS	46
3.4.1 PROPUESTA I: Secador continuo de flujo paralelo	47

3.4.2	<i>PROPUESTA 2: Secador continuo de flujo perpendicular</i>	48
3.4.3	<i>PROPUESTA 3: Secador de bandeja de flujo paralelo</i>	49
3.4.4	<i>PROPUESTA 4: Secador de bandejas transportadas por rodillos y flujo paralelo</i>	50
3.4.5	<i>PROPUESTA 5: Secador de bandejas transportadas por rodillos y flujo perpendicular</i>	51
3.5	ESTUDIO PRELIMINAR DE COSTOS	52
3.6	ANÁLISIS MORFOLÓGICO	53
3.6.1	<i>PARÁMETROS PARA LA SELECCIÓN DE LAS OPCIONES</i>	53
3.6.2	<i>MATRIZ MORFOLÓGICA</i>	55
3.7	CONCLUSIONES DEL DISEÑO METODOLÓGICO	56
 <u>CAPÍTULO IV</u> CÁLCULOS Y DISEÑO		
4.1	SELECCIÓN DEL TIPO DE SECADOR	57
4.2	DETERMINACIÓN Y CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO	57
4.2.1	<i>TEMPERATURA DE AIRE DE SECADO</i>	57
4.2.2	<i>HUMEDAD FINAL DEL PRODUCTO</i>	58
4.2.3	<i>HUMEDAD RELATIVA DEL AIRE</i>	58
4.2.4	<i>PRESIÓN</i>	58
4.2.5	<i>HUMEDADES CARACTERÍSTICAS</i>	59
4.3	DISEÑO Y/O SELECCIÓN DE LOS COMPONENTES	60
UCV-FI-EIM		X

4.3.1 ESTRUCTURA	60
4.3.2 VENTILADOR	61
4.3.3 RESISTENCIA ELÉCTRICA	63
4.3.4 SELECCIÓN DEL TERMOSTATO	66
4.3.5 SELECCIÓN DEL AISLANTE	67
4.3.5.1 CÁLCULO DE LA PÉRDIDA DE CALOR EN LA CÁMARA DE SECADO	67
4.3.5.2 REDUCCIÓN DE LA PÉRDIDA DE CALOR EN LA CÁMARA DE SECADO	71
4.4 TIEMPO DE SECADO TEÓRICO	73
4.5 PESO DE LA ESTRUCTURA	73
 <u>CAPÍTULO V</u> DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO	
5.1 GENERALIDADES	75
5.2 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	78
5.3 CONSUMO ELÉCTRICO DEL EQUIPO	78
 <u>CAPITULO VI</u> RESULTADOS PRÁCTICOS	
6.1 CONDICIONES AMBIENTALES	79
6.2 MATERIALES Y EQUIPOS	79
6.3 METODOLOGÍA DEL ENSAYO DE SECADO	81
6.4 METODOLOGÍA DEL ENSAYO DE TEMPERATURA	82

6.5 RESULTADOS	82
6.5.1 CURVAS DE SECADO	85
6.5.2 GRÁFICA VELOCIDAD DE SECADO VS. HUMEDAD	91
6.5.3 TASA DE SECADO CONSTANTE	93
6.6 ANÁLISIS DE RESULTADOS	93
 <u>CAPITULO VII</u>	
COSTOS Y MANTENIMIENTO	
7.1 ESTUDIO ECONÓMICO	95
7.2 PRODUCCIÓN	95
7.2.1 PRODUCCIÓN ESTIMADA	95
7.2.1.1 PRODUCCION POR MEDIO DEL SECADOR SOLAR	97
7.2.1.2 PRODUCCIÓN POR MEDIO DEL SECADOR ELÉCTRICO	97
7.3 COSTOS DEL SECADOR ELÉCTRICO	98
7.3.1 COSTO DE FABRICACIÓN	98
7.3.2 COSTO ENERGÉTICO	98
7.3.3 COSTOS DE OPERACIÓN	98
7.4 IMPACTO AMBIENTAL	98
7.5 PLAN DE MANTENIMIENTO	99
7.5.1 MANTENIMIENTO DEL SECADOR	99
7.6 INSTRUCCIONES DE OPERACIÓN	102

7.7 ALMACENAJE Y TRANSPORTE	103
CONCLUSIONES	104
RECOMENDACIONES	105
BIBLIOGRAFÍA	107
PLANOS DEL SISTEMA	
ANEXO 1 DATOS CLIMATOLÓGICOS	
ANEXO 2 MATERIALES	
ANEXO 3 COMPONENTES SELECCIONADOS	
ANEXO 4 PROPIEDADES DEL AIRE	
ANEXO 5 COSTOS	
ANEXO 6 SECADOR SOLAR VS. SECADOR ELÉCTRICO	

INDICE DE FIGURAS

CAPITULO I **INTRODUCCIÓN**

- Figura 1.1 Pato Real.
- Figura 1.2 Peletizadora.
- Figura 1.3 Estado Amazonas – Venezuela.
- Figura 1.4 Granja Piloto FUDECI – Pto. Ayacucho.

CAPITULO II **FUNDAMENTOS TEÓRICOS**

- Figura 2.1 Humedad base seca vs. Tiempo.
- Figura 2.2 Tasa de Secado vs. Tiempo.
- Figura 2.3 Tasa de Secado vs. Humedad libre.
- Figura 2.4 Flujo Paralelo.
- Figura 2.5 Flujo Perpendicular.
- Figura 2.6 Flujo A través.
- Figura 2.7 Flujo en contracorriente.
- Figura 2.8 Flujo concurrente.
- Figura 2.9 Secador Rotativo.
- Figura 2.10 Secador de Rodillo.
- Figura 2.11 Secador de Bandeja.
- Figura 2.12 Secador de Túnel.
- Figura 2.13A Secador de Cinta Transportadora.
- Figura 2.13B Secador de Cinta Transportadora.
- Figura 2.14 Secador de lecho fluidizado.
- Figura 2.15 Secador Spray.
- Figura 2.16 Carta Psicrométrica.

CAPÍTULO III **MARCO METODOLÓGICO**

- Figura 3.1 Propuesta 1.
Figura 3.2 Propuesta 2.
Figura 3.3 Propuesta 3.
Figura 3.4 Propuesta 4.
Figura 3.5 Propuesta 5.

CAPÍTULO IV **CÁLCULOS Y DISEÑO.**

- Figura 4.1 Estufa.
Figura 4.2 Humedad vs. Tiempo con la estufa.
Figura 4.3 Ventilador Alpha 16-4T
Figura 4.4 Transferencia de calor sobre una pared plana.
Figura 4.5 Analogía Eléctrica.
Figura 4.6 Vista general del prototipo.
Figura 4.7 Exterior de la sección de calentamiento.
Figura 4.8 Posterior de la sección de calentamiento.
Figura 4.9 Interior de la sección de calentamiento.
Figura 4.10 Frente del tablero eléctrico.
Figura 4.12 Cámara de secado.
Figura 4.13 Bandejas.
Figura 4.14 Desarme de las secciones

CAPÍTULO V **DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO**

- Figura 5.1 Distribución de las probetas.
Figura 5.2 Curva Humedad vs. Tiempo (Probeta 1)
Figura 5.3 Curva Tasa de Secado vs. Humedad.

INDICE DE TABLAS

CAPITULO II **FUNDAMENTOS TEÓRICOS**

Tabla 2.1 Tipos de secadores más utilizados para ciertos alimentos.

Tabla 2.2 Componentes del alimento para Pato Real.

CAPITULO III **MARCO METODÓLGICO**

Tabla 3.1 Ponderación de Costos.

Tabla 3.2 Matriz Morfológica.

CAPÍTULO IV **CALCULOS Y DISEÑO**

Tabla 4.1 Lista de Materiales.

Tabla 4.2 Temperaturas máximas de foro metálico.

Tabla 4.3 Características de la resistencia VRE – 3000.

Tabla 4.4 Propiedades del aire a 303,35 K.

Tabla 4.5 T y $\bar{h}$ en la superficie del aislante.

Tabla 4.6 Especificaciones Técnicas.

Tabla 4.7 Consumo eléctrico del equipo.

CAPITULO V **RESULTADOS PRÁCTICOS**

Tabla 5.1 Condiciones atmosféricas

Tabla 5.2A Temperatura a la entrada de la cámara de secado.

Tabla 5.2B Temperatura a la entrada de la cámara de secado.

Tabla 5.3 Peso vs. Tiempo.

Tabla 5.4 Peso de alimento seco.

Tabla 5.5 Humedad vs. Tiempo.

CAPITULO VI

COSTOS Y MANTENIMIENTO

Tabla 6.1 Consumo de alimento de Pato Real.

Tabla 6.2 Clasificación de las partes del secador.

Tabla 6.3 Plan de mantenimiento del equipo.

ABREVIATURAS Y NOMENCLATURAS

Símbolos

A	Área de la superficie en contacto con la corriente de aire.
A_b	Área de la base de la cámara de secado
A_d	Área transversal del ducto.
A_l	Área transversal libre
A_s	Área de la cara lateral de la cámara de secado.
A_t	Área del techo de la cámara de secado
A_{tb}	Área transversal de 1 bandejas
C_p	Calor específico a presión constante.
e	Profundidad de la sección transversal de la capa de material a secar.
ec.	Ecuación
ej.	Ejemplo
etc.	Etcétera
$F.S.$	Factor de seguridad.
G	Velocidad másica del aire
g	Gravedad
H	Altura
h	Coefficiente de transferencia de calor
hp	Caballo de fuerza
$\overline{h_b}$	Coefficiente de convección asociado a la base.
$\overline{h_s}$	Coefficiente de convección asociado a los lados.
$\overline{h_t}$	Coefficiente de convección asociado al techo.
h_{fg}	Calor latente de vaporización a la temperatura de superficie del material.

K	Kelvin
k	Conductividad térmica del material.
k_{aisl}	Conductividad térmica del aislante
$kg.$	Kilogramo
kg/m^3	Kilogramo por metro cúbico.
kJ/kgK	Kilojoule por kilogramo Kelvin
$kgW/kgMS$	Kilogramo de agua entre kilogramo de materia seca
kW	Kilovatio
K_l	Constante de función de la tasa de secado constante
L	Longitud característica
m_s	Masa de material seco
m/s	Metro por segundo
m^2	Metro cuadrado
m^3	Metro cúbico
$\overline{Nu}_{lb}$	Número de Nusselt para convección libre asociado a la base.
$\overline{Nu}_{ls}$	Número de Nusselt para convección libre asociado a los lados.
$\overline{Nu}_{lt}$	Número de Nusselt para convección libre asociado al techo.
P	Potencia
p	Presión parcial de vapor
P_r	Número de Prandlt
P_{res}	Potencia de la resistencia
P_v	Presión de vapor
P_{vs}	Presión de vapor saturado
Q	Caudal de aire.
q''	flujo de calor por unidad de área.
q_{cond}	Calor Conducido
q_{conv}	Calor Convectado
q_p	Calor perdido en la cámara de secado.

Ra_l	Número de Raleigh para convección libre
R_c	Tasa de Secado Constante.
$R_{c_{aisl}}$	Resistencia térmica del aislante.
R_{conv}	Resistencia térmica por convección
t_t	Tiempo total de secado.
t_c	Tiempo de secado en el período constante.
t_d	Tiempo de secado en el período decreciente
T_a	Temperatura de bulbo seco del aire.
T_{bh}	Temperatura de Bulbo Húmedo
T_e	Temperatura externa de la superficie del aislante
T_f	Temperatura de película
T_{op}	Temperatura de operación
T_s	Temperatura de la superficie del sólido.
T_s	Temperatura de superficie
T_{sup}	Temperatura supuesta del espesor del aislante
T_∞	Temperatura ambiente
T_1	Temperatura de la superficie 1
T_2	Temperatura de la superficie 2.
V	Volumen de material
v	Velocidad del aire
W_{bh}	Contenido de humedad en base húmeda
W_{bs}	Contenido de humedad en base seca
W_c	Humedad Crítica
W_e	Humedad de equilibrio
W_f	Humedad final
W_o	Humedad Inicial
W_{oc}	Humedad inicial en el período constante.
W/m^2	Vatio por metro cuadrado

W/plg^2	Vatio por pulgada cuadrada
$^{\circ}C$	Grado Centígrado
$-\frac{dW}{dT}$	Pérdida de humedad por unidad de sólido seco y por unidad de tiempo.

Letras Griegas

α	Difusividad térmica
β	Coefficiente de expansión térmica volumétrica
ν	Viscosidad cinemática.
ρ	densidad del sólido húmedo
ρ_a	Densidad del aire
ρ_p	Densidad de potencia.
ρ_s	Densidad del sólido seco
Δl_{aisl}	Espesor del aislante

INTRODUCCIÓN

El secado de los alimentos como método de conservación es una de las técnicas de procesamiento más antiguas y efectivas que se conocen y practican. En la actualidad, todavía es el método más utilizado por millones de agro procesadores en todo el mundo. Tradicionalmente en las comunidades rurales de Venezuela, el secado de los alimentos y/o cultivos se realiza por exposición de los productos a la acción del sol (secado natural) sobre patios de cemento, maderas o esteras, para lograr de esta forma una reducción de la humedad inicial que presenta hasta valores adecuados para su conservación y así aumentar la perecibilidad de los mismos. Desafortunadamente este proceso presenta los siguientes problemas:

- Contaminación por polvos o residuos extraños.
- Infestación por insectos.
- Secados incompletos.
- Riesgos de lluvias repentinas o altas humedades ambientales.
- Interferencia animal o humana.
- Mayor tiempo de secado.

La dependencia de dicho método de las condiciones meteorológicas evidencia la necesidad del secado por otro método.

1.1 ANTECEDENTES

Existen diversos tipos de secado y cada uno de ellos tiene características que pueden ser más indicados para uno u otro tipo de producto y condiciones locales.

Una de las maneras más simples para lograr el secado es exponer el material húmedo a una corriente de aire con determinadas condiciones de temperatura, humedad y velocidad. Entre más seco y más caliente esté el aire, mayor será la velocidad de secado.

En el país existen fábricas encargadas de producir alimentos para animales, las cuales aplican tecnologías que resultan costosas para un pequeño productor. Estas fábricas utilizan secadores industriales para sus procesos los cuales son imposibles de adquirir por pequeños productores.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

FUDECI (Fundación para el Desarrollo de las Ciencias Físicas y Matemáticas) en su afán de fomentar la investigación científica y tecnológica en el área ambiental dirigida a mejorar la calidad de vida del hombre ha propuesto el desarrollo de un alimento de origen vegetal en forma de pelet que cumpla con los requerimientos nutricionales del Pato Real (Fig. 1.1), especie que representa una de las principales fuentes de proteínas para las comunidades indígenas de la zona. Actualmente ya se encuentra desarrollado este alimento, así como la máquina Peletizadora. (Fig. 1.2).

El alimento sale de la Peletizadora con un alto porcentaje de humedad (50% base húmeda aproximadamente.), lo que impide su almacenamiento seguro, ya que cuando existen altos porcentajes de humedad se forma un ambiente propicio para el

desarrollo de hongos y/o bacterias que dañan el producto. Es por esto que debe reducirse el porcentaje de humedad para conservarlo y empacarlo por largos períodos de tiempo.



Fig. 1.1. Pato Real.
(Fuente: Los Autores).



Fig. 1.2. Peletizadora.
(Fuente: Los Autores).

Este trabajo consistirá en diseñar y construir un secador para alimentos de origen vegetal, el cual permita al pequeño productor preparar el alimento para luego empacarlo.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

- Diseñar y construir un secador de alimentos de origen vegetal en el Estado Amazonas.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Recopilar información técnica referente a los secadores de alimentos existentes.
- Definir los parámetros que intervienen en el proceso de secado.
- Comparar este sistema con el método de secado por radiación solar directa.
- Diseñar un prototipo de secador de alimentos de origen vegetal.
- Seleccionar los materiales.
- Construir el prototipo propuesto.
- Evaluar el equipo mediante ensayos.
- Realizar un estudio económico del diseño propuesto.
- Trazar un plan de mantenimiento del equipo.

1.4 LIMITACIONES

El trabajo que se presenta abarca cálculos, selección de elementos y planos detallados, no incluye el proceso de fabricación de las partes que conforman el sistema.

Una vez definidos los objetivos, antecedentes y limitaciones del problema, es necesario conocer los aspectos teóricos que rodean al mismo. El desarrollo de un marco teórico que exponga el funcionamiento del sistema es fundamental para resolver el problema planteado.

1.5 FUDECI

FUDECI es una organización no gubernamental (ONG) sin fines de lucro, fundada en 1973 por la Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales. Su junta Directiva está integrada por miembros de esta academia.

1.5.1 VISIÓN DE FUDECI

Mejorar la calidad de vida del hombre realizando y fomentando investigaciones científicas y tecnológicas que permitan ejecutar programas de ayuda a las familias rurales más necesitadas, así como velando por un ambiente natural sano a través de programas e investigaciones para la conservación de los recursos biológicos.

1.5.2 MISIÓN DE FUDECI

- Mejorar la alimentación e ingresos económicos de familias de bajos recursos en zonas rurales mediante la generación de paquetes tecnológicos, que permitan desarrollar y ejecutar programas agrícolas dirigidos a estas familias.
- Participar en la conservación de la biodiversidad realizando investigaciones que nos permitan ejecutar programas de recuperación de especies en peligro de extinción, realizando investigaciones sobre el uso potencial o real de los recursos biológicos; realizando programas de concienciación; y a través de proyectos de rescate de información del uso tradicional de los recursos biológicos.

- Difundir el conocimiento científico mediante la publicación de revistas y artículos científicos y a través de la organización y participación de eventos científicos.
- Apoyar a la Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales.

FUDECI con la finalidad de mejorar la calidad de vida de habitantes de bajos recursos en el área rural está desarrollando proyectos en el área agrícola que involucra la adaptación y/o creación de nuevas tecnologías para mejorar la producción agrícola al nivel familiar en comunidades indígenas y campesinas al Norte de Estado Amazonas y Sur del Estado Anzoátegui.

1.5.3 UBICACIÓN

La granja piloto se encuentra ubicada en Puerto Ayacucho – Vía Cataniapo en el Estado Amazonas – Venezuela, lugar donde va a prestar servicio la secadora.

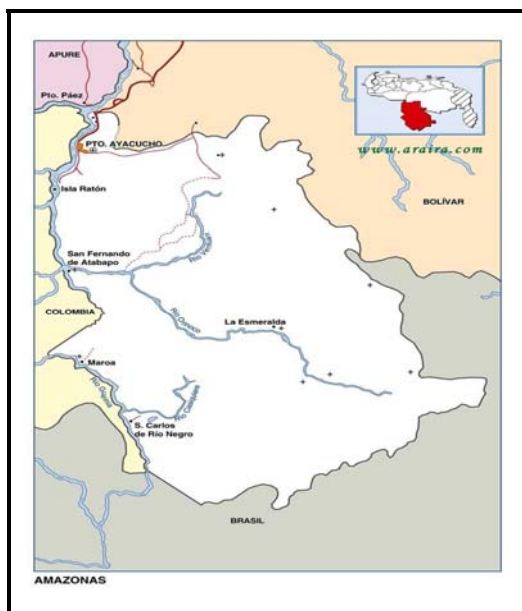


Fig. 1.3. Estado Amazonas -Venezuela.
(Fuente www.araira.com)



Fig. 1.4. Granja Piloto FUDECI – Pto. Ayacucho. (Fuente: Los Autores).

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

En el presente trabajo se empleará el término “secado” para referirse a la remoción de agua de materiales de proceso u otras sustancias por evaporación, mediante la aplicación de calor bajo condiciones controladas, aunque la expresión “secado” también se usa en operaciones orientadas a remover otros líquidos orgánicos (benceno, por Ej.) de sólidos. En algunos casos, el agua puede ser removida de los sólidos mecánicamente por medio de prensas, centrifugación y otros métodos. En nuestro concepto, sin embargo, secado significará la remoción térmica de agua.

2.1 PRINCIPIOS DE SECADO

El secado consiste generalmente en la eliminación de humedad de una sustancia por evaporación del agua de la superficie del producto, traspasándola al aire circundante. La rapidez de este proceso depende del aire (la velocidad con la que éste circule alrededor del producto, su grado de sequedad, etc.), y de las características del producto (composición, contenido de humedad, tamaño de las partículas, etc.). El secado es un proceso en el que se intercambian calor y masa. Incluye una operación energética elemental y representa una de las acciones térmicas básicas en la industria de procesos y agro-alimentaria. El secado o deshidratación se usa como técnica de preservación, pues muchas enzimas y microorganismos que causan cambios químicos en los alimentos y otros materiales, no pueden crecer y desarrollarse en ausencia de agua.

Las razones para su empleo son de diversos tipos:

- Facilitar la manipulación en etapas posteriores.
- Reducir gastos de transporte.

- Facilitar la conservación.
- Aumentar el valor del producto.
- Aprovechar subproductos.
- Reducir volumen y aumentar la capacidad de aparatos en otras etapas del proceso, etc.

2.1.1 MÉTODOS DE SECADO

En general, los distintos métodos para llevar a cabo la desecación de sólidos o líquidos pueden ser de tipo mecánico o físico-químico. Los más importantes son los siguientes:

Mecánicos:

- a) Prensado: Consiste en separar un líquido de un sistema sólido-líquido, por compresión del sistema en condiciones que permitan que el líquido escape mientras que el sólido quede retenido entre las superficies que lo comprimen.
- b) Centrifugación: Consiste en aplicar una fuerza centrífuga lo suficientemente elevada, de forma que el líquido se desplace en dirección de la fuerza produciéndose la separación.

Físico-químicos:

- a) Evaporación superficial: Cuando el producto húmedo se somete a la acción de una corriente de aire caliente, el líquido se evapora aumentando la humedad del aire.
- b) Liofilización: El líquido a eliminar, previamente congelado, se separa del producto que lo contiene mediante sublimación, por aportación de calor y vacío. Se aplica sobre todo a alimentos.

- c) Absorción: Este término se aplica a gases húmedos, de los que se elimina el vapor de la mezcla gaseosa solubilizándolo en un líquido, como por ejemplo la desecación de gases por tratamiento con ácido sulfúrico.
- d) Adsorción: Consiste en la separación de la humedad por retención sobre un sólido absorbente, como por ejemplo la desecación de aire con gel de sílice.
- e) Congelación: Separación de la humedad de un líquido por cristalización de la misma, que se separa en forma sólida.

2.1.2 CONCEPTOS BÁSICOS

Conviene establecer la diferencia entre dos conceptos similares que suelen confundirse: *Desecación*, que consiste en la eliminación de agua de un material hasta que su contenido esté en equilibrio con el aire que lo rodea, y *deshidratación*, que consiste en la eliminación prácticamente total del agua que pueda contener. La diferencia entre estos conceptos es, básicamente cuantitativa.

-Humedad libre: Es la humedad en exceso que contiene un sólido sobre la humedad de equilibrio en unas condiciones dadas de temperatura y de humedad. Sólo la humedad libre puede ser evaporada, y lógicamente depende de la concentración del gas (A través de la humedad de equilibrio).

-Humedad ligada: Es aquella humedad que en un sólido ejerce una presión de vapor menor que la del agua pura a una temperatura dada. Esta humedad puede tratarse de aquella contenida dentro de las paredes celulares, pequeños capilares o grietas, por solución homogénea dentro del sólido y por adsorción química o física en la superficie del sólido.

-Humedad no ligada: En un material higroscópico, la humedad en exceso por encima de la humedad de equilibrio y que ejerce una presión de vapor igual a la del agua pura a la misma temperatura.

-Contenido de humedad: El *contenido de humedad* de un producto puede expresarse sobre la base del peso húmedo, es decir la masa de agua por unidad de masa de producto húmedo. Otra manera de expresar el contenido de humedad es en base al peso seco, es decir la masa de agua por unidad de masa de componentes sólidos desecados. La humedad de los sólidos se puede determinar por distintos procedimientos. Los métodos directos se basan en eliminar el agua que contiene el sólido y determinar la cantidad por pesada o por medios químicos. Por ejemplo el secado en estufa de vacío hasta pesada constante, se utiliza sobre todo para materiales que pueden deteriorarse a elevadas temperaturas. También se utiliza el secado en estufa a presión atmosférica, que suelen utilizar aire forzado y donde el tiempo de secado está estandarizado. Los métodos indirectos se basan en la medida de alguna propiedad del material que resulte afectada por el contenido de humedad.

-Contenido de humedad en base húmeda (W_{bh}): Representa la humedad en un material como un porcentaje del peso del sólido húmedo. Se expresa como *kg. de agua entre kg. de material húmedo* (*kg. de sólido seco + kg. de agua*).

-Contenido de humedad en base seca (W_{bs}): Se expresa como *kg. de agua entre kg. de sólido seco*.

-Humedad crítica (W_c): Es el contenido de humedad promedio cuando la tasa de secado constante termina y comienza la tasa de secado decreciente.

-Humedad de equilibrio (W_e): La humedad contenida en un sólido húmedo o en una solución ejerce una presión de vapor dependiente de la naturaleza de la

humedad, de la naturaleza del sólido y de la temperatura. Si el sólido húmedo se expone a una corriente de gas con una presión parcial de vapor p , el sólido perderá humedad por evaporación, o la ganará a expensas del gas hasta que la presión de vapor de la humedad del sólido iguale a la presión parcial de dicha corriente gaseosa. El sólido y el gas se encuentran, entonces en equilibrio, y la humedad del sólido se denomina humedad de equilibrio. No es posible predecir el contenido de humedad de equilibrio de diversos materiales, por lo que se hace necesario determinarlo por vías experimentales. De la misma manera, en muchos casos resulta indispensable obtener algunas mediciones experimentales de las velocidades de secado. Para un mismo sólido la humedad de equilibrio disminuye con la temperatura. La humedad de equilibrio de un sólido es independiente de la naturaleza del gas seco, siempre que este sea inerte respecto del sólido, tanto seco como cuando va acompañado del vapor condensable. Lógicamente, la humedad de equilibrio sí depende de la naturaleza del vapor que los humedece.

-Material higroscópico: Es aquel tipo de material que puede contener humedad ligada.

-Material no higroscópico: Es aquel tipo de material que puede contener humedad no ligada.

-Período de secado constante: Es el período de secado durante el cual la remoción de agua por unidad de área de secado es constante.

-Período de secado decreciente: Es el período de secado en el cual la tasa de secado instantánea decrece continuamente.

-Flujo capilar: Es el flujo de líquido a través de los intersticios por encima de la superficie del sólido, causado por la atracción molecular líquido-sólido.

2.2 ENCOSTRAMIENTO Y EMPARDEAMIENTO

Muchos alimentos tienen una capa exterior de protección que impide que su interior se seque por completo. No hay mucho que se pueda hacer en el caso de los cereales y legumbres, que normalmente se secan enteros, pero el nivel de secado de otros productos puede facilitarse si el alimento se pela o corta.

Luego que la humedad de la superficie de un alimento se ha retirado por evaporación, el nivel de secado depende de la velocidad con la que su humedad interna se dirige a la superficie, lo que varía de un producto a otro. Por ejemplo, a diferencia de los materiales con almidón, los alimentos ricos en azúcares liberan más lentamente los niveles de humedad, por lo que necesitan más tiempo para su deshidratado. El tamaño también es un factor a tomar en cuenta: mientras más pequeña sea la pieza de alimento que se va a deshidratar, menor será la distancia que debe recorrer la humedad interna para llegar a la superficie. Por ello, técnicas como el cortado y el rebanado pueden ser útiles. Si el alimento va a cortarse, se debe tener cuidado con el tipo de utensilios que se van a usar. Se recomiendan los instrumentos de acero inoxidable, pues los de hierro pueden decolorar el alimento.

Si se busca un producto de primera calidad, debe prestarse especial atención a los niveles de secado. La temperatura moderada y un alto grado de humedad dentro de la secadora favorecen el desarrollo de hongos, levaduras y bacterias. Si se toma en cuenta este aspecto, podría pensarse que cuanto más corto es el período de secado mejor son los resultados. Sin embargo, esto no se aplica para todos los alimentos: si se apresura el secado de productos ricos en almidones, por ejemplo, ocurre un fenómeno conocido como *encostramiento*.

El *encostramiento* se produce cuando el agua que hay dentro del alimento no puede salir debido a la velocidad con que se ha secado la superficie. Así, el proceso

de secado puede verse interrumpido si la superficie del alimento se seca por completo, creando una costra que evita que la humedad que estaba emergiendo continúe su curso

En otros casos, aumentar la temperatura para intensificar el proceso de secado destruye las vitaminas, lo que origina la pérdida de color, sabor y la ruptura del alimento. La decoloración suele ocurrir tanto durante las fases preliminares como en las del secado propiamente dicho. Así, se produce el *empardeamiento* causado por reacciones químicas y bioquímicas o por sobrecalentamiento.

Es más factible que el *empardeamiento* producido por reacción química se presente entre las azúcares y las proteínas. Esta coloración, además, es necesaria en la producción de ciertos alimentos de primera calidad. Como ejemplos se pueden citar la corteza del pan y el color oscuro en algunas frutas secas, como las pasas.

El *empardeamiento* bioquímico es causado por la secreción de enzimas de las células de la planta y su consecuente reacción con otros químicos naturales presentes en el alimento. Algunos ejemplos son el color oscuro que adquieren las rodajas frescas de papa o manzana después de haber sido cortadas. Esta coloración debe evitarse.

2.3 VELOCIDAD DE SECADO

Al desecar un sólido húmedo con aire caliente, el aire aporta el calor sensible y el calor latente de la evaporación de la humedad y también actúa como gas portador para eliminar el vapor de agua que se forma en la vecindad de la superficie de evaporación.

En la Fig. 2.1, 2.2 y 2.3, se muestran las curvas típicas de *Humedad vs. Tiempo*, la de *Velocidad de Secado vs. Tiempo* y la de *Velocidad de Secado vs. Humedad* respectivamente, para condiciones de secado constantes.

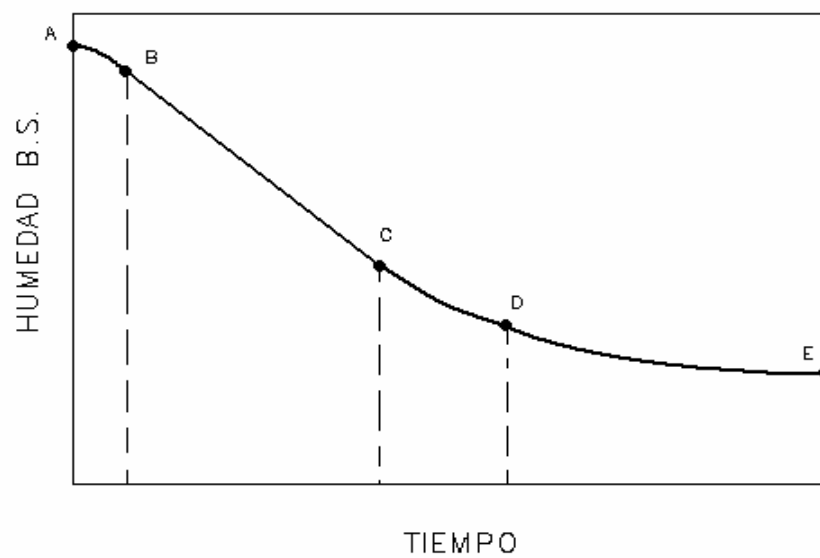


Fig. 2.1. Gráfico Humedad vs. Tiempo.
(Fuente: Los Autores)

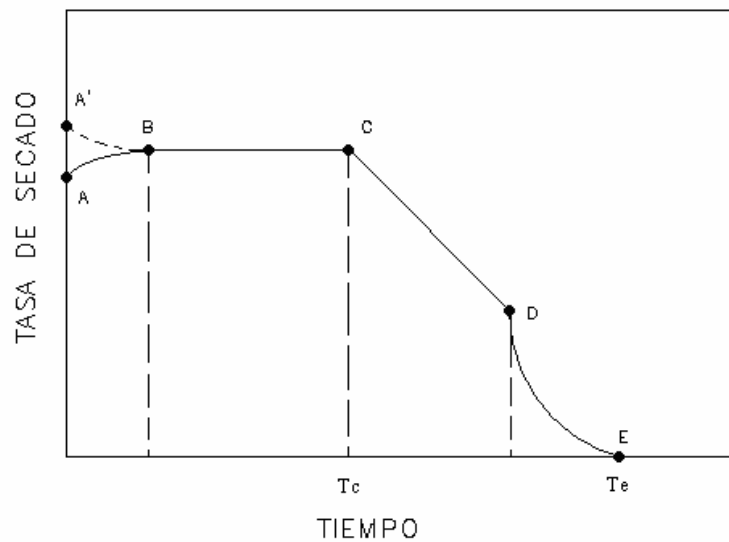


Fig. 2.2. Gráfico Tasa de secado vs. Tiempo
(Fuente: Los Autores)

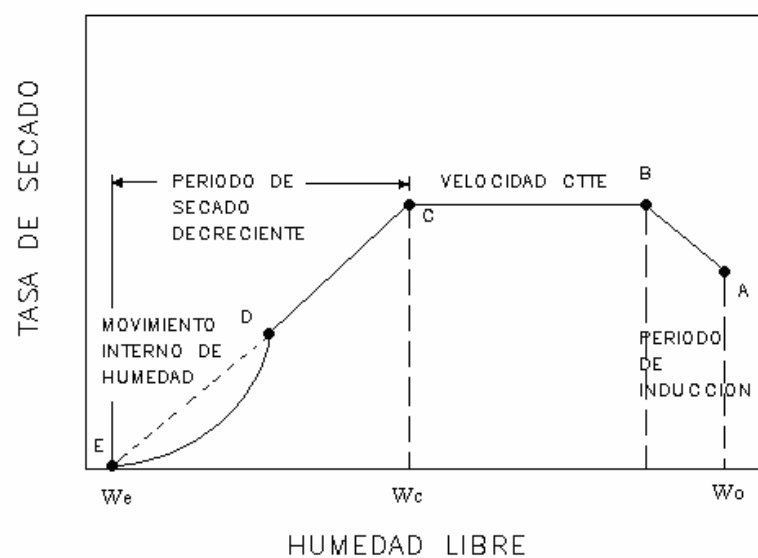


Fig. 2.3. Gráfico Tasa de secado vs. Humedad libre
(Fuente: Los Autores)

Si se empieza con un tiempo cero, el contenido inicial de humedad libre corresponde al punto **A**. Al principio, el sólido suele estar a una temperatura inferior a la que tendrá al final y la velocidad de evaporación irá en aumento. Al llegar al punto **B**, la temperatura de la superficie alcanza su valor de equilibrio. Este período inicial de ajuste o “*estabilización*” con estado inestable suele ser bastante corto y generalmente se ignora en el análisis de los tiempos de secado. La curva de la figura es recta entre los puntos **B** y **C**, por lo que la pendiente y la velocidad son constantes durante este período. A esta zona se le conoce como *región de velocidad de secado constante*. En el punto **C** de la gráfica, la velocidad de secado comienza a disminuir durante el *período de velocidad decreciente*, hasta llegar al punto **D**. Finalmente, en el punto **D**, la velocidad de secado disminuye con más rapidez aún, hasta que llega al punto **E**, donde ya no es apreciable.

Durante el *período de secado constante*, la superficie del sólido está muy mojada y sobre ella existe una película de agua. Esta capa de agua, llamada humedad no ligada, está siempre sin combinar y actúa como si el sólido no estuviera presente. Si el sólido es poroso, la mayor parte del agua que se evapora durante el período de velocidad constante proviene del interior del sólido. Este período continuará mientras el agua siga llegando a la superficie con la misma rapidez con la que se evapora. Durante esta fase, la velocidad de secado depende de la velocidad de transferencia de calor a la superficie de desecación. La velocidad de transferencia de masa se equilibra con la velocidad de transferencia de calor, de forma que la temperatura en la superficie de secado se mantiene constante, tal como ocurre con la temperatura de la camisa de un termómetro de bulbo húmedo.

En tanto la tasa de evaporación superficial controle el proceso (período velocidad de secado constante), la tasa de secado constante R_e , se puede calcular mediante un balance de calor [6]. Sea ρ_s la densidad del sólido seco en kg . de material seco por m^3 de material húmedo, e la profundidad de la sección transversal

de material (si el secado ocurre por ambas caras, e será la mitad de la profundidad), m_s la masa de material seco y A el área de la superficie en contacto con la corriente de aire, el volumen de material V es (2.1):

$$V = A * e = \frac{m_s}{\rho_s} \quad (2.1)$$

Reordenando, queda:

$$\frac{A}{m_s} = \frac{1}{e * \rho_s} \quad (2.2)$$

Aplicando un balance de calor:

Calor latente de evaporación = Calor transferido

$$-\left(\frac{dW}{dt}\right)_c * m_s * \Delta h_{fg} = h * A * (T_a - T_s) \quad (2.3)$$

Siendo $R_c = -\left(\frac{dW}{dt}\right)_c$, y despejando en:

$$R_c = \frac{h * A * (T_a - T_s)}{\Delta h_{fg} * m_s} \quad (2.4)$$

La temperatura de la superficie (T_s), es igual a la temperatura de bulbo húmedo del aire (T_{bh}), mientras dura el período de secado constante.

El punto **C** de la gráfica corresponde a la situación en la cual no hay suficiente agua en la superficie para mantener una película continua. La superficie ya no está totalmente mojada, y la porción mojada comienza a disminuir durante este período y como la velocidad de secado es función del área total, esta velocidad decrecerá, aunque la velocidad de secado por unidad de área permanezca constante. El contenido de humedad en el punto **C** se conoce como *humedad crítica* (W_c), y el período que continúa a partir de ese punto se conoce como *período de velocidad decreciente*. La naturaleza del movimiento de humedad desde el interior del sólido hacia la superficie influencia el comportamiento del sólido en el período de secado decreciente. Existen varios mecanismos que rigen el control de migración de humedad en el período decreciente de humedad. Los más importantes son difusión, capilaridad y gradiente de presión causado por el encogimiento del sólido.

En el primer *período de velocidad decreciente*, que se conoce como *período de secado de superficie no saturada*, la velocidad de secado decrece linealmente con respecto al contenido de humedad. Este período puede estar o no presente en el proceso, o puede representar todo el *período de velocidad decreciente* dependiendo del tipo de material. El segundo *período de velocidad decreciente*, que se conoce como *período de difusión*, empieza en el punto **D**. El plano de evaporación comienza a desplazarse con lentitud por debajo de la superficie. El calor para la evaporación se transfiere a través del sólido hasta la zona de vaporización. El agua vaporizada atraviesa el sólido para llegar hasta la corriente de aire hasta que se alcanza la *humedad de equilibrio* (W_e). Es posible que la cantidad de humedad que se elimina durante el período de velocidad decreciente sea pequeña, no obstante, el tiempo requerido puede ser largo.

El fenómeno de capilaridad es el responsable del movimiento del líquido en el lecho durante el proceso de secado. La velocidad de secado en el *período descendiente*, en el caso de un control por capilaridad viene dada por la ec.(2.5) [17]:

$$\left(\frac{dW}{dt}\right)_d = -K_1 * (W - W_e) \quad (2.5)$$

Donde K_1 es función de la tasa de secado constante:

$$K_1 = -\frac{\left(\frac{dW}{dt}\right)_c}{W_c - W_e} \quad (2.6)$$

Sustituyendo (2.6) en (2.5):

$$\left(\frac{dW}{dt}\right)_d = -\frac{R_c * (W - W_e)}{W_c - W_e} \quad (2.7)$$

Las variables que influyen en la velocidad de secado son:

- *Naturaleza del material*: Resulta evidente que se obtendrán curvas distintas dependiendo de las características del material a secar.
- *Temperatura del aire*: Cuanto mayor sea la temperatura del aire de secado (manteniendo constante el resto de las variables), mayor será la velocidad de secado, y las curvas presentarán mayor pendiente.
- *Velocidad másica del aire*: Con este parámetro se pueden presentar dos tipos de comportamiento. En el primero la velocidad de secado es directamente proporcional a la velocidad del aire. En el segundo caso, la velocidad de secado es prácticamente independiente de la velocidad del aire, lo que indica que en

este caso la etapa controlante es la transferencia de materia a través del sólido, que lógicamente no se ve afectada por la velocidad del aire.

- *Humedad absoluta del aire:* Al aumentar la humedad absoluta del aire disminuye lógicamente, la velocidad de secado, al hacerlo la fuerza impulsora en la fase gas.

- *Tamaño de partícula del sólido:* Si las características del sólido permiten obtener partículas uniformes, al variar el tamaño se puede observar que la velocidad de secado aumenta al disminuir el tamaño de la partícula. Si se trata de un sólido que no permite obtener tamaños uniformes, la influencia de la profundidad del lecho es similar a la anteriormente comentada. Al aumentar la altura del lecho disminuye la velocidad de secado.

2.4 TIEMPO DE SECADO

Si se desea determinar el tiempo de secado de un sólido en las mismas condiciones en las que se determinó la Fig. 2.1, sólo se requiere leer la diferencia de tiempo entre el contenido inicial y final de humedad.

Si se dispone de los datos de humedad inicial (W_o), humedad crítica (W_c), humedad final (W_f) y R_c , el tiempo de secado total se puede calcular teóricamente a partir de la ec. (2.8) [4]:

$$t_t = t_c + t_d \quad (2.8)$$

El tiempo de secado en el periodo de secado constante t_c , se calcula integrando R_c con respecto al tiempo:

$$\int_{W_0}^{W_c} dW = - \int_0^{t_c} R_c * dt \quad (2.9)$$

De donde:

$$t_c = \frac{(W_0 - W_c)}{R_c} \quad (2.10)$$

El tiempo total, incluyendo el período de secado decreciente t_d , se calcula integrando la ec. (2.7):

$$\int_{W_c}^W \frac{(W_e - W_c)}{R_c * (W - W_e)} = \int_{t_c}^{t_t} dt \quad (2.11)$$

Reordenando y resolviendo, nos queda que:

$$t_t - t_c = \frac{(W_c - W_e)}{R_c} * \ln \frac{(W_c - W_e)}{(W - W_e)} \quad (2.12)$$

Sustituyendo (2.10) en (2.12):

$$t_t = \frac{(W_0 - W_c)}{R_c} + \frac{(W_c - W_e)}{R_c} * \ln \frac{(W_c - W_e)}{(W - W_e)} \quad (2.13)$$

2.5 CIRCULACIÓN DE AIRE

El aire circula dentro del secador con el fin de entregar calor a los productos, así como eliminar la humedad evaporada del mismo. Esta circulación se logra por diversos métodos, donde los más importantes son:

- *Circulación forzada*: El aire es movido por un ventilador que consume energía mecánica o eléctrica.
- *Circulación por convección natural*: El aire es movido por las diferencias de temperatura entre las distintas partes del equipo, que promueven la convección térmica del aire. No se necesita energía externa. El uso de chimeneas constituye un caso particular de convección natural.

La circulación forzada facilita el diseño en el caso de los equipos de mayor tamaño. Este tipo de circulación también facilita el control del proceso de secado. La circulación forzada permite mayor libertad en la colocación de los diversos elementos que integran el equipo.

Usando este tipo de circulación se pueden obtener velocidades de circulación de aire entre 0.5 a 10 m/s y no hay problemas de circulación de aire para equipos de tamaño mayor.

La principal desventaja de la circulación forzada es el hecho de que se debe disponer de una fuente de energía eléctrica, en la mayoría de los casos.

2.5.1 DIRECCIÓN DEL FLUJO AIRE RESPECTO A LA SUPERFICIE DE SECADO

2.5.1.1 FLUJO PARALELO

En este sistema la dirección del aire de secado fluye paralelo a la superficie de secado. El contacto del aire ocurre, primordialmente en la interfase entre el aire de secado y la superficie del sólido a secar con, posiblemente, cierta penetración del aire en el material cerca de la superficie. La cama de material se encuentra usualmente estática. Para materiales sólidos dispuestos en planchas sobre bandejas o cintas y flujo paralelo, el coeficiente de transferencia de calor h por convección en Sistema Internacional, se puede calcular con la ec. (2.14) [4]:

$$h = 14,305 * G^{0,8} \quad (2.14)$$

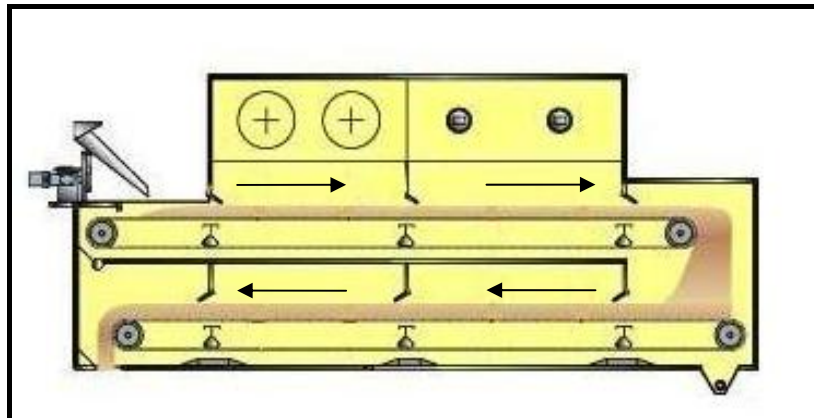


Fig. 2.4. Flujo paralelo (Fuente: www.wenger.com).

2.5.1.2 FLUJO PERPENDICULAR

La dirección del aire de secado es normal a la superficie de secado. La penetración del aire dentro de la superficie del material es mayor que en el flujo paralelo. Usualmente en este caso, la cama de material se encuentra también en estado estático. Para materiales sólidos dispuestos en planchas sobre bandejas o cintas y flujo perpendicular, el coeficiente de transferencia de calor por convección h en Sistema Internacional, se puede calcular con la ec. (2.15) [4]:

$$h = 413,5 * G^{0,37} \quad (2.15)$$

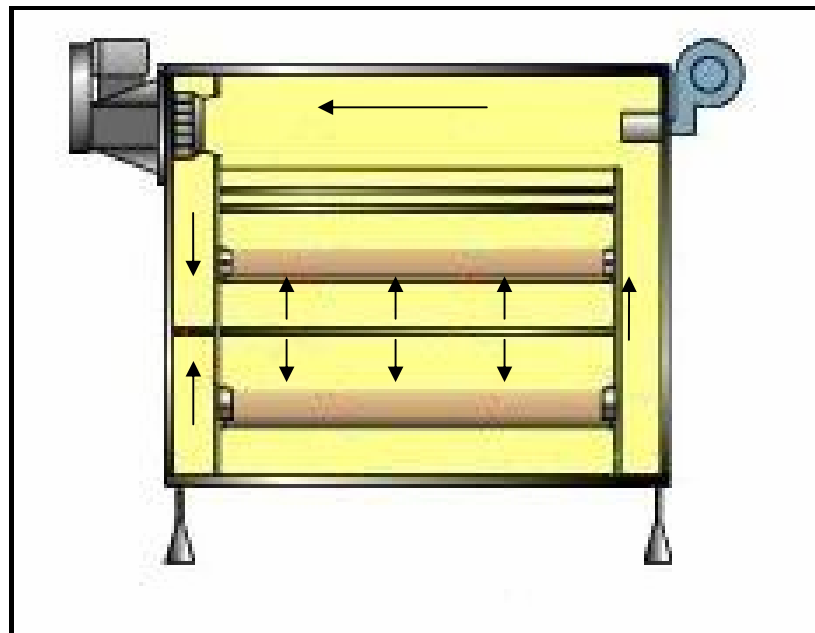


Fig. 2.5. Flujo perpendicular.

(Fuente: www.wenger.com)

2.5.1.3 FLUJO A TRAVÉS

En este caso, el aire de secado fluye a través de la cama de material, circulando más o menos libremente por los intersticios entre las partículas sólidas. Esto puede ocurrir cuando la cama se encuentra en estado estático, fluidizado o diluido.

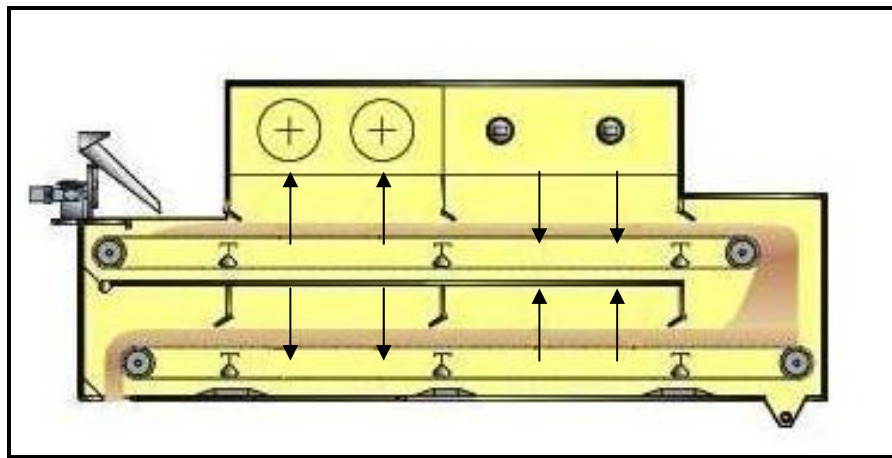


Fig. 2.6. Flujo a través
(Fuente: www.wenger.com)

2.5.2 DIRECCIÓN DEL FLUJO DE AIRE RESPECTO AL MOVIMIENTO DEL MATERIAL

2.5.2.1 FLUJO EN CONTRACORRIENTE

En este sistema, el producto húmedo entra a la cámara de secado en dirección contraria a la corriente de aire y es descargado caliente del mismo. Este tipo de circulación se usa cuando las temperaturas de secado son bajas, obteniéndose buenos resultados en el tiempo de secado.

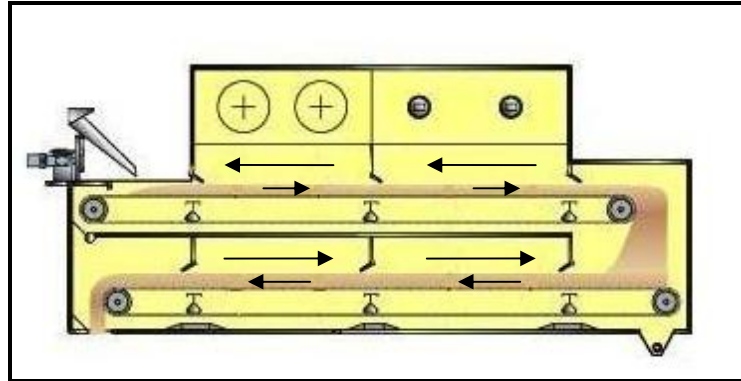


Fig.2.7. Flujo en contracorriente.
(Fuente: www.wenger.com)

2.5.2.2 FLUJO CONCURRENTE

En este sistema, el aire de secado caliente fluye en la misma dirección que lo hace el material a secar. El aire se va enfriando y el sólido se va calentando, de forma que al final del secador se dispone, comparativamente al caso de contracorriente, de una menor fuerza impulsora.

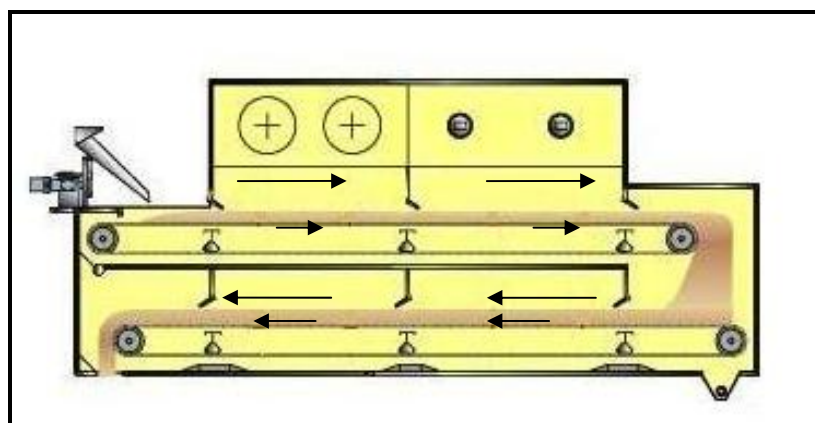


Fig. 2.8. Flujo concurrente.
(Fuente: www.wenger.com)

2.5.2.3 FLUJO CRUZADO

En este sistema, la dirección del flujo de aire es perpendicular a la dirección en la que se mueve el material, y paralela a la superficie del lecho.

2.6 MÉTODOS DE SECADO PARA ALIMENTOS

Los métodos de secado se clasifican como *métodos directos* y *métodos indirectos*.

2.6.1 MÉTODOS DIRECTOS

Los *métodos directos* de secados son aquellos en los cuales la fuente de energía logra por sí misma el secado, ejemplo de ello es el secado tradicional de alimentos expuestos al sol.

Las características generales de los secadores directos son:

- 1) El secado se efectúa por transferencia de calor por convección entre el sólido húmedo y un gas caliente, extrayendo el último al líquido vaporizado, así como también suministrando el calor necesario para la evaporación.
- 2) El medio de calefacción puede ser aire calentado por vapor, gases de combustión, una atmósfera inerte calentada, como el nitrógeno, o un vapor sobrecalentado, como el vapor de agua.
- 3) Las temperaturas de secado pueden variar desde las temperaturas atmosféricas reinantes hasta cerca de 800 °C.

4) A temperaturas de secado inferiores al punto de ebullición del líquido, las cantidades crecientes de vapor de este líquido en el gas de secado disminuirán la velocidad de secado y aumentarán el contenido final de líquido en el sólido.

5) Cuando las temperaturas de secado son superiores a la temperatura de ebullición a lo largo de todo el proceso, un aumento en el contenido de vapor en el gas o aire no tendrá, en general, ningún efecto retardante sobre la velocidad de secado ni tampoco sobre el contenido final de humedad.

6) Para secado a baja temperatura, se requiere a menudo la deshumidificación del gas de secado cuando prevalecen altas humedades atmosféricas.

7) La eficiencia de los secadores directos crecerá con un aumento en la temperatura de entrada del gas de secado, a temperatura fija de salida.

8) En los secadores directos discontinuos, el costo de operación es en general mucho más elevado.

2.6.2 MÉTODOS INDIRECTOS

El *método indirecto* es aquel en el cual una fuente de energía externa calienta el medio secante.

Las características generales operatorias de los secadores indirectos son las siguientes:

1) Secado mediante transferencia de calor por conducción y algo de radiación al material húmedo. La conducción tiene lugar generalmente a través de una pared metálica de contención. La fuente de calor es, por lo general, el vapor condensante, pero puede ser también agua caliente, gases de combustión, baños de sales fundidas para transferencia del calor, aceite caliente, o calefacción eléctrica.

2) La temperatura de secado de la superficie de contacto puede variar desde una temperatura inferior al punto de congelación hasta una temperatura de 550 °C.

3) Los secadores indirectos son especialmente adecuados para el secado a presiones reducidas y con atmósferas inertes, y, por consiguiente se presta bien para recuperación de disolventes.

4) Los secadores indirectos que emplean vapor condensante son generalmente de alta eficiencia a causa de que el calor es suministrado de acuerdo con la demanda, pero como en todos los secadores, la eficiencia disminuye de modo apreciable cuando se requieren contenidos muy bajos de humedad final.

5) Los secadores indirectos pueden tratar materiales productores de polvo con mayor facilidad que los secadores directos.

6) La operación de los secadores indirectos se caracteriza a menudo por algún método de agitación para mejorar el contacto entre la superficie metálica caliente y el material húmedo. La naturaleza de este contacto determina el rendimiento total de secado de los secadores indirectos; los materiales pesados y granulados presentan por lo general coeficientes más elevados de transferencia de calor por contacto que los sólidos mullidos y voluminosos.

Los métodos indirectos empleados en la desecación de los alimentos pueden clasificarse convenientemente de la siguiente manera:

- Desecación con aire caliente: El alimento se pone en contacto con una corriente de aire caliente. El calor se aporta principalmente por convección.
- Desecación por contacto directo con una superficie caliente: El calor se aporta al producto principalmente por conducción.
- Desecación mediante el aporte de energía de una fuente radiante, de microondas o dieléctrica.
- Liofilización: El agua de los alimentos se congela y seguidamente se sublima a vapor, generalmente por aporte de calor en condiciones de presión muy baja.

2.7 SELECCIÓN DEL MÉTODO DE SECADO

Existen numerosos métodos de secado, que se ajustan a los diversos materiales y las diferentes condiciones a que han de someterse. La selección puede efectuarse con arreglo a varios criterios, basados en estos aspectos fundamentales:

- Tipo de materias tratadas.
- Método de calefacción.
- Calidad requerida.
- Factores económicos.
- Modo de funcionamiento (continuo o discontinuo).

La Tabla 2.1 presenta un cuadro ilustrativo referente a la selección del método de secado de acuerdo al producto a desecar. Posterior a la selección, se hace el análisis correspondiente para calcular los valores de temperatura, velocidad, presión y humedad a los cuales operará la máquina.

PRODUCTO	TIPO DE SECADOR
Hortalizas, frutas, confitería.	Bandejas y túnel.
Forrajes, granos, hortalizas, frutas, nueces, cereales de desayuno.	Cinta.
Forrajes, granos, manzanas, lactosa, estiércol de aves, turba, almidón.	Rotativos.
Café, leche, té, puré de frutas	Atomización (Spray).
Leche, almidón, alimentos infantiles predigeridos, sopas, productos de cervecería y destilería.	Tambor.
Almidón, pulpa de frutas, residuos de destilería	Neumático.
Café, esencias, extracto de carne, frutas, hortalizas	Congelación y vacío.
Hortalizas	Lecho fluidizado.
Manzanas y algunas hortalizas	Horno.

Tabla 2.1 Tipos de secadores más utilizados para ciertos alimentos.
Fuente: Sökhansanj y Jayas, Mujumdar. 1995.

2.8 TIPOS DE SECADORES

La naturaleza, tamaño y forma de los sólidos a ser secados, la escala de operación, el método de transporte y el tipo de contacto con el gas, el modo de calentamiento, etc., son algunos de los muchos factores que conducen al desarrollo de una considerable variedad de equipos.

2.8.1 SECADORES ROTATIVOS

En este tipo de secador el producto húmedo se hace girar en una cámara cilíndrica por la que se hace pasar aire caliente mientras el producto se mantiene en agitación. En algunos casos se calienta también la pared de la cámara o se instalan tubos calentados en el interior del cilindro. La cámara cilíndrica se instala sobre rodillos quedando ligeramente inclinada. La superficie interior de la cámara esta provista de aletas batidoras que agitan el producto al girar la cámara, haciendo que el producto caiga a través de la corriente de aire caliente que pasa por el cilindro. El aire puede fluir paralelamente o a contracorriente respecto a la dirección del movimiento de los sólidos.

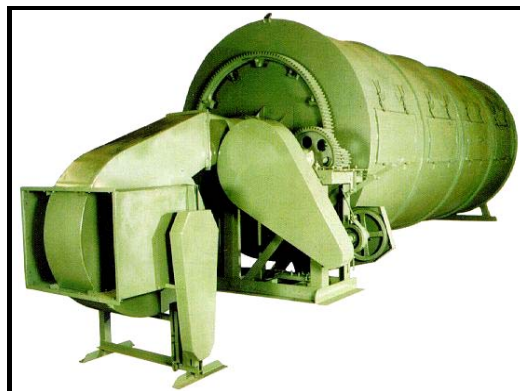


Fig. 2.9: Secador Rotativo (Fuente: www.agrotrends.br)

2.8.2 SECADORES DE RODILLO

Pertenecen también al tipo de secaderos de calefacción indirecta. Los más sencillos son los empleados en el secado de artículos que se presentan en forma de hoja continua, como papel, tejidos, etc. Constan de un rodillo hueco, de superficie perfectamente lisa, calentado interiormente por vapor o resistencias, que gira arrastrado por la hoja continua del material.



Fig. 2.10. Secador de Rodillo (Fuente: www.wetlay.vt.edu).

2.8.3 SECADORES DE COMPARTIMIENTOS, BANDEJAS O CABINA

Esencialmente consiste en una cabina aislada provista interiormente de un ventilador para circular el aire a través de un calentador; el aire caliente sale por una rejilla de láminas ajustables y es dirigido, ya sea horizontalmente entre bandejas cargadas de alimento o verticalmente a través de las bandejas perforadas y el alimento. Los calentadores de aire pueden ser quemadores directos de gas, serpentines calentados por vapor o, en los modelos más pequeños, calentadores de resistencia eléctrica.



Fig. 2.11. Secador de Bandeja.

(Fuente: www.narchem.com/dryer_ss.htm).

2.8.4 SECADORES DE TÚNEL

Este tipo de equipo permite desecar frutas y verduras de forma semi-continua con una gran capacidad de producción. Consiste en un túnel que puede tener hasta unos 24 m. de longitud con una sección transversal rectangular o cuadrada de unos 2 por 2 m. El producto húmedo se dispone uniformemente sobre bandejas que se apilan sobre carros, dejando espacio entre ellas para que circule el aire. El flujo de aire puede ser concurrente, a contracorriente o cruzado.



Fig. 2.12. Secador de túnel
(Fuente: www.daelimmcc.co.kr)

2.8.5 SECADORES DE CINTAS TRANSPORTADORAS

Son secadores continuos con circulación de aire a través del material o paralelo a este, que se traslada sobre un transportador de cinta perforada (generalmente). Esta cinta suele ser de malla metálica o de lámina de acero perforada, aunque también se consigue de malla plástica. El producto húmedo se carga de manera mecanizada, en un extremo de la cinta, en capas de 10 a 15 *cm.* de espesor. La cinta transportadora se desplaza a una velocidad que viene fijada por el tiempo de secado.



Fig. 2.13A. Secador de Cinta Transportadora.

(Fuente: www.rosler.fr)



Fig. 2.13B. Secador de Cinta Transportadora.

(Fuente: www.inx.com)

2.8.6 SECADORES DE LECHO FLUIDIZADO

En este tipo de secador el aire caliente es forzado a través de un lecho de sólidos de forma tal que dichos sólidos queden suspendidos en el aire. El aire caliente actúa tanto como medio fluidizante como de desecación.

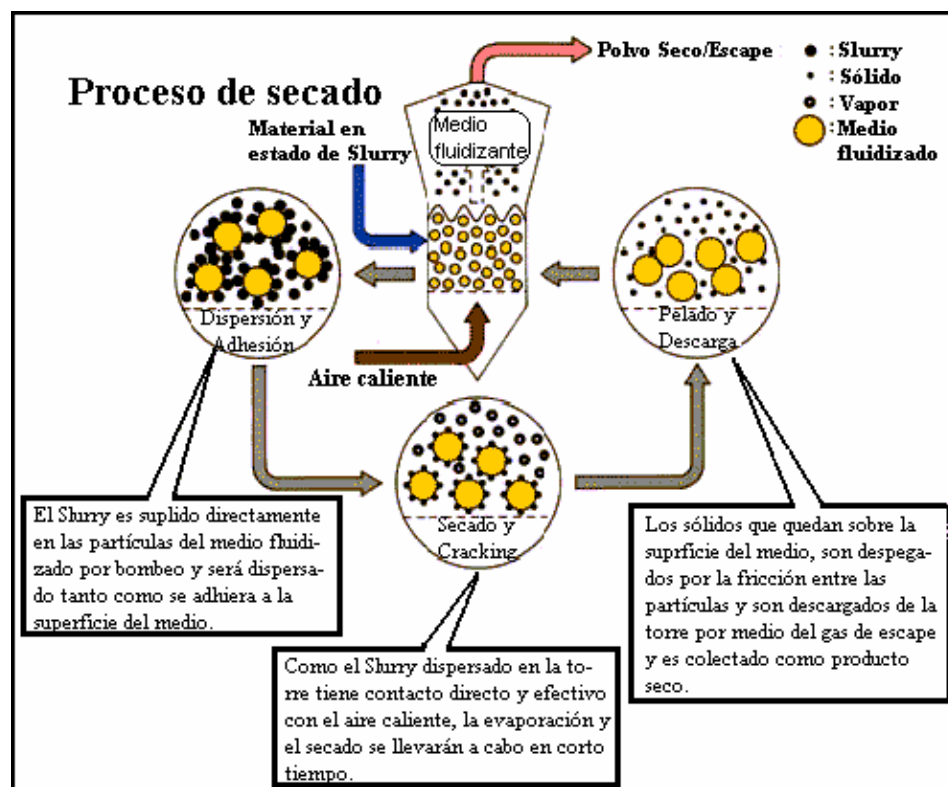


Fig. 2.14. Secador de lecho fluidizado.

(Fuente: www.nara-e.de.com)

2.8.7 SECADORES DE SPRAY

El agua de una suspensión de finas gotas o partículas de una disolución o suspensión se puede evaporar, produciendo una nebulización (Spray) de las mismas en una cámara por donde se hace circular gases calientes. Este proceso resulta adecuado para el secado de materiales que tienen baja estabilidad térmica, como es el caso de la leche, el café, el plasma, ciertos polímeros, etc. En este tipo de secadores hay que atomizar y distribuir el material bajo condiciones controladas, lo que repercute en los costos de operación.

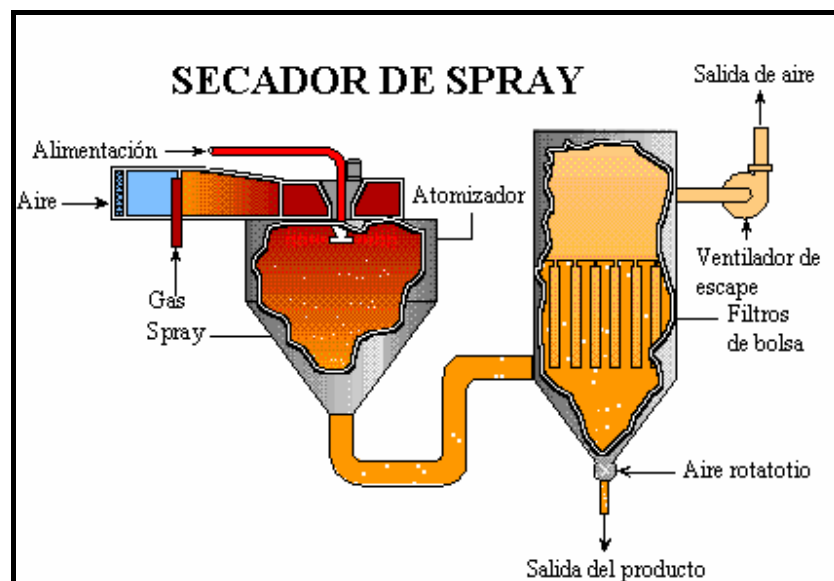


Fig. 2.15. Secador de Spray

(Fuente: www.narchem.com/dryer_ss.htm).

2.9 FORMA DE OPERACIÓN

- *Secado en tandas*: El producto es cargado en una sola tanda y la misma no se retira hasta que esté completamente seca. Todo el producto dentro del secador va pasando de un estado húmedo a un estado seco en forma paulatina. Permite un diseño más sencillo del proceso de carga y movimiento del producto dentro del equipo, por lo que resulta apropiado en secadores pequeños y medianos.
- *Secado continuo*: El producto se va cargando y descargando en tandas parciales. Dentro del mismo secador se encuentra una parte de producto húmedo y otra casi seca. El período entre cargas de las tandas varía de acuerdo al diseño. En algunos casos la carga y descarga parcial se realiza una vez por día. En otros casos se puede llevar a cabo varias veces en el mismo día.

2.10 PSICROMETRÍA

La *psicometría* se define como “aquella rama de la física relacionada con la medición o determinación de las condiciones del aire atmosférico, particularmente respecto de la mezcla de aire seco y vapor de agua”, o bien “aquella parte de la ciencia que está en cierta forma íntimamente ligada a las propiedades termodinámicas del aire húmedo”. Las propiedades termodinámicas de la mezcla de aire seco y vapor de agua revisten gran interés en la etapa de poscosecha de productos agrícolas, por el efecto que tiene la humedad del aire atmosférico sobre el contenido de humedad de los productos.

2.10.1 PROPIEDADES TERMODINÁMICAS DEL AIRE HUMEDO

2.10.1.1 HUMEDAD RELATIVA

La *humedad relativa* del aire, se define como la relación entre la presión de vapor de agua en un momento dado (P_v) y la presión de vapor de agua cuando el aire está saturado de humedad (P_{vs}), a la misma temperatura. Aire absolutamente seco, sin vapor de agua en su interior, contiene una humedad relativa de 0%, mientras que el aire saturado de agua tiene una humedad relativa de 100%. La cantidad de vapor de agua que el aire puede absorber depende, en gran medida, de su temperatura. A medida que el aire se calienta, su humedad relativa decae y, por tanto, puede absorber más humedad. Al calentarse el aire alrededor del producto, éste se deshidrata más rápidamente

2.10.1.2 TEMPERATURA DE BULBO SECO

La *temperatura de bulbo seco*, es la verdadera temperatura del aire húmedo y con frecuencia se le denomina sólo temperatura del aire. Es la temperatura del aire que marca un termómetro común.

2.10.1.3 TEMPERATURA DE BULBO HÚMEDO

La *temperatura termodinámica de bulbo húmedo*, es la temperatura de equilibrio que se alcanza cuando la mezcla de aire seco y vapor de agua pasa por un proceso de enfriamiento adiabático hasta llegar a la saturación. Una definición simple de este concepto es la siguiente: “Es la temperatura indicada por un termómetro que tiene su bulbo humedecido e inmerso en una corriente de aire”. Esta temperatura puede ser determinada de la *carta psicrométrica* para aire húmedo, para el período de secado constante.

2.10.1.4 PRESIÓN DE VAPOR

La *presión de vapor* (P_v), es la presión parcial que ejercen las moléculas de vapor de agua presentes en el aire húmedo. Cuando el aire está totalmente saturado de vapor de agua, su presión de vapor se denomina presión de vapor saturado (P_{vs}).

2.10.1.5 ENTALPÍA

La *entalpía* de aire seco y vapor de agua, es la energía del aire húmedo por unidad de masa de aire seco, por encima de una temperatura de referencia.

2.10.1.6 VOLUMEN ESPECÍFICO

El *volumen específico* del aire húmedo, se define como el volumen que ocupa la mezcla de aire seco y vapor de agua por unidad de masa de aire seco. La masa específica del aire húmedo no es igual al recíproco de su volumen específico. La masa específica del aire húmedo es la relación entre la masa total de la mezcla y el volumen que ella ocupa.

2.10.2 CARTA PSICROMÉTRICA

Las propiedades termodinámicas de la mezcla de aire seco y vapor de agua que constituyen el aire atmosférico, se pueden presentar adecuadamente en forma de gráfico, con el nombre de *carta psicrométrica*, el cual se construye según una presión atmosférica determinada., aunque suele haber curvas de corrección para otras presiones. (Fig. 2.16)

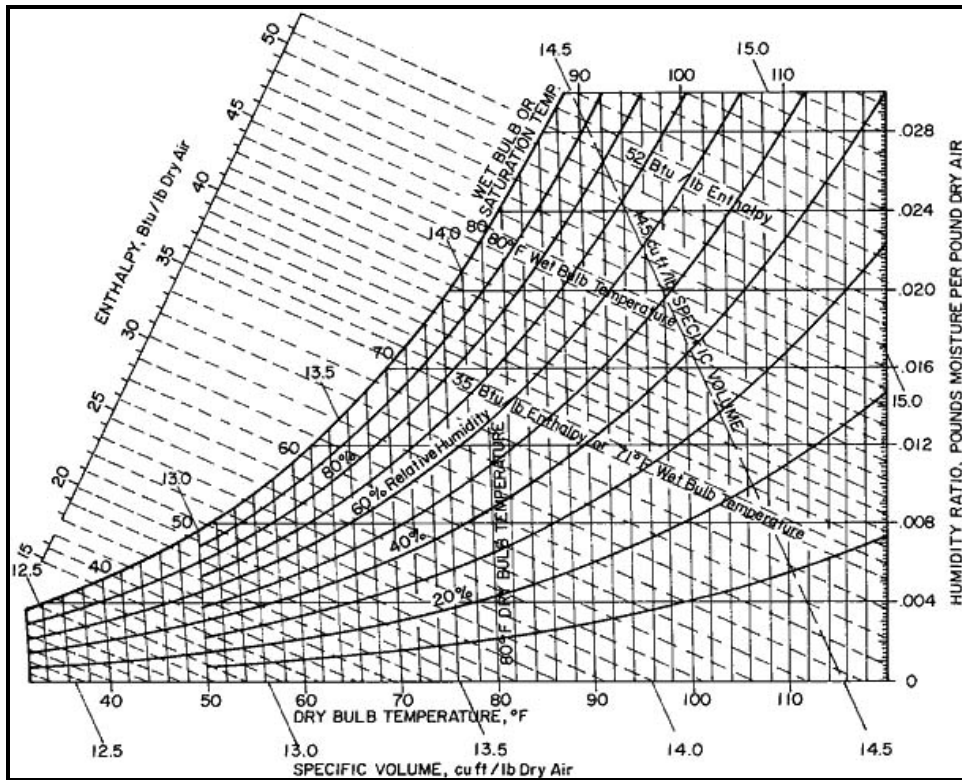


Fig. 2.16 Carta Psicrométrica.

(Fuente: www.editorial.cda.ulpgc.es)

2.11 TRANSFERENCIA DE CALOR

La transferencia de calor hacia la interfase puede tener lugar por conducción, convección y radiación.

2.11.1 CONDUCCIÓN

La conducción se considera como la transferencia de energía de las partículas más energéticas a las menos energéticas de una sustancia debido a las interacciones entre las mismas.

La ec. (2.16) rige el transporte molecular por conducción en una dirección:

$$q_k = -k * A * \frac{dt}{dh} \quad (2.16)$$

Integrando la ec. (2.16) con respecto al tiempo, tenemos que:

$$q_k = -\frac{k * A_m * (T - T_i)}{h} \quad (2.17)$$

2.11.2 CONVECCIÓN

El modo de transferencia de calor por convección se compone de dos mecanismos. Además de la transferencia de energía debida al movimiento molecular aleatorio (difusión), la energía también se transfiere mediante el movimiento global, o macroscópico del fluido.

La ecuación general en régimen estacionario (2.18) rige la transferencia de calor por convección:

$$q_c = -h * A_c * (T - T_i) \quad (2.18)$$

2.11.3 RADIACIÓN

La radiación térmica es la energía emitida por la materia que se encuentra a una temperatura finita.

La ecuación general (2.19) es del mismo tipo que las anteriores:

$$q_r = \varepsilon * \sigma * (T_s^4 - T_{aire}^4) \quad (2.19)$$

2.12 EL ALIMENTO

El alimento para consumo del Pato Real fabricado en la Estación Experimental FUDECI –Pto. Ayacucho es una combinación de harinas las cuales son mezcladas y humedecidas en la peletizadora. Dicho alimento está compuesto de manera porcentual por los siguientes elementos:

COMPONENTE	% EN PESO
Maíz	10.2
Harina de Pescado	2.04
Harina de Naranjillo	12.24
Alimento Concentrado iniciador para Pollo	16.32
Harina de Maíz Precocida	10.2
Agua	49
TOTAL	100

Tabla 2.2. Componentes del Alimento para Pato Real
(Fuente: FUDECI - -Pto. Ayacucho).

Son varios los factores que determinan el comportamiento de los materiales almacenados, y aunque ellos se relacionan y afectan entre sí, es conveniente analizarlos separadamente; los principales son: humedad, temperatura del material, presencia de microorganismos e insectos, nivel de impurezas, forma y tiempo de almacenamiento.

El acondicionamiento más apropiado, se determinará, de acuerdo a los factores anteriores, con las condiciones del sitio de almacenamiento.

En el proceso posterior de secado, se debe tener cuidado de no calentar el material sobre límites determinados empíricamente y de acuerdo con su uso final.

Para materiales que se destinen a un almacenamiento largo, se debe controlar la temperatura de almacenamiento; si los secadores utilizados cuentan con sección de enfriamiento, ésta debe utilizarse en la última etapa de secamiento; si se carece de ella, es conveniente realizar un paso rápido del material por la torre utilizando sólo el ventilador, de tal manera que la temperatura del material que se empaque, no sea superior en más de 5°C a la temperatura ambiente, con el fin de disminuir el riesgo de migraciones de humedad al tomar contacto la masa caliente de material con las paredes más frías de los empaques.

MARCO METODOLÓGICO

3.1 METODOLOGÍA DEL DISEÑO

Para realizar un diseño es necesario seguir un procedimiento creativo para obtener así la solución más favorable al problema planteado, para ello se desarrollarán las posibles soluciones utilizando un razonamiento lógico y creativo, sin realizar un detalle exhaustivo de cada una.

Por último, se realizará un estudio de cada posible solución, realizando una comparación entre ellas, tomando en cuenta ciertos parámetros, para así excluir las ideas con poco potencial y elegir la mejor propuesta, la cual será desarrollada y explicada posteriormente.

3.2 CLARIFICACIÓN DE LA TAREA

Diseñar y construir el prototipo de un secador con una capacidad de 30 *kg.* de alimentos de origen vegetal, obteniendo el producto final a una humedad de 12.5 % en base húmeda.

3.3 RESTRICCIONES PRELIMINARES

Como primera restricción al estudiar las posibles soluciones para el problema que se presenta, se observó que se debía analizar las características del alimento producido en FUDECI, para así enfocar los esfuerzos para el secado del mismo, tales como: humedad inicial, peso, dimensiones y demanda.

Otra restricción a nuestro trabajo son las condiciones ambientales presentes en la zona, factor que influye determinantemente en el diseño del sistema así como la simplicidad del mismo y la disponibilidad de energía eléctrica y/o combustibles.

El transporte y acceso debe ser tomado en cuenta, puesto que la solución definitiva está orientada a comunidades rurales y su manejo no debe ser complicado.

3.4 TORMENTA DE IDEAS

Este método fue ideado por Alex Osborn (Milani, 1978) y consiste en reunir un grupo para trabajar sobre un problema. El grupo debe trabajar sobre las siguientes reglas:

- No se permite ninguna evaluación o juicio sobre las ideas, de no ser así se corre el riesgo de que cada participante se enfoque en defender su idea en vez de buscar nuevas ideas.
- Debe buscarse un gran número de ideas porque esto ayudará a evitar evaluarlas internamente.
- Debe promoverse entre los miembros del grupo, que construyan o modifiquen las ideas de otros, porque esto generalmente desemboca en ideas superiores a las iniciales.

En este caso se realizaron una serie de bocetos y consideraciones acerca del tipo de secador, con el fin de procesar 30 kg. de alimento de origen vegetal en forma de

pelet en Pto. Ayacucho, Estado Amazonas. Este sistema también puede ser capaz de adaptarse a cualquier zona del país o cualquier otro tipo de alimento a ser secado.

Partiendo de este método, se ha desarrollado una tormenta de ideas las cuales se explica a continuación.

3.4.1 PROPUESTA 1: Secador continuo de flujo paralelo

Aquí se plantea la circulación del aire de secado en dirección paralela al transporte del alimento. El calentamiento del aire se produce por medio de una resistencia eléctrica y es circulado por un ventilador a lo largo de la secadora. El alimento húmedo entra a la cámara de secado por una tolva ubicada en la parte superior, luego es transportado por medio de una banda transportadora hasta que se seque y finalmente es descargado por otra tolva. Un dibujo ilustrativo de dicha propuesta se presenta en la Fig.3.1:

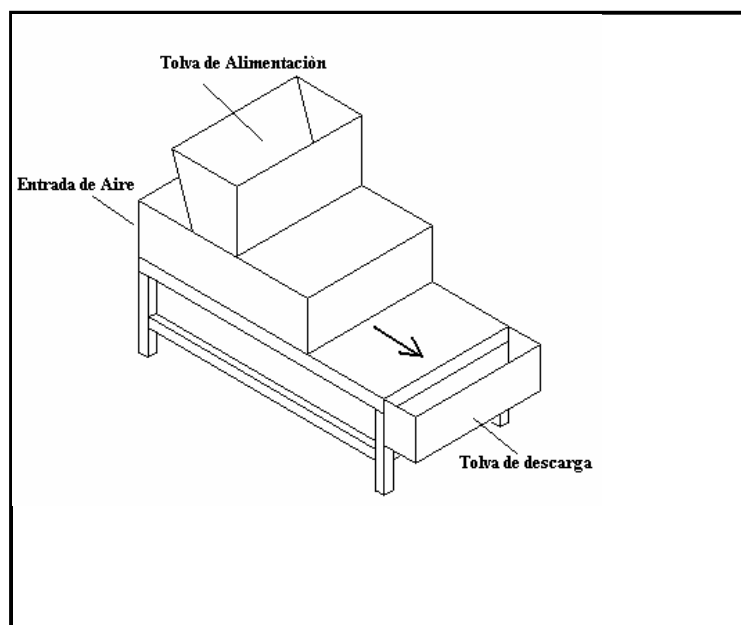


Fig. 3.1. Propuesta 1. (Fuente: Los Autores).

3.4.2 PROPUESTA 2: Secador continuo de flujo perpendicular

La presente propuesta es básicamente igual a la anterior, su diferencia radica en la dirección del flujo de aire, la cual es perpendicular a la dirección del movimiento de secado. La Fig. 3.2 representa esta propuesta.

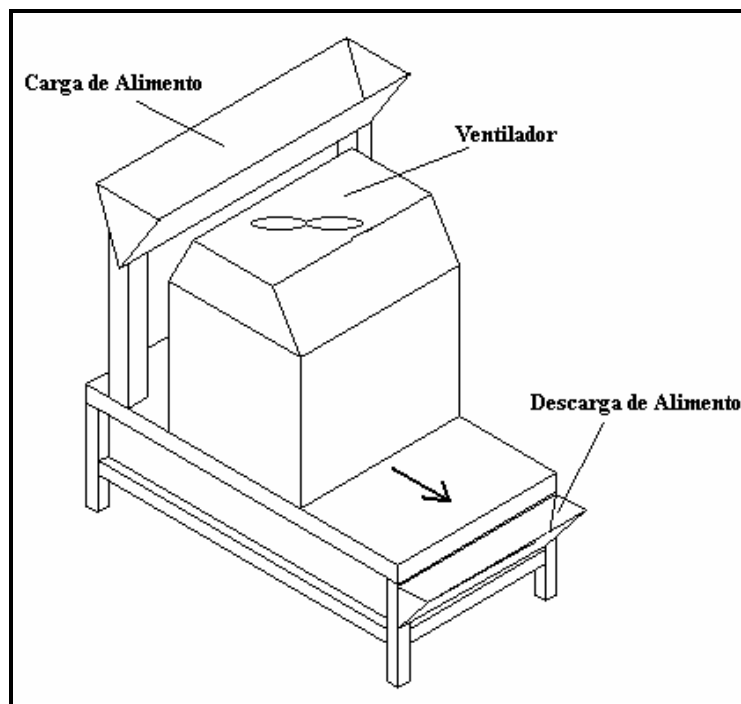


Fig. 3.2. Propuesta 2. (Fuente: Los Autores)

3.4.3 PROPUESTA 3: Secador de bandeja de flujo paralelo

La tercera propuesta plantea un secador de bandejas en el cual la dirección del aire caliente es paralela al alimento. Este modelo consta de dos secciones: la sección de calentamiento y la cámara de secado. En la sección de calentamiento se encuentra ubicado la resistencia eléctrica y el ventilador, mientras que en la cámara de secado consta de las bandejas las cuales contienen el alimento. La representación de esta propuesta se presenta en la Fig. 3.3.:

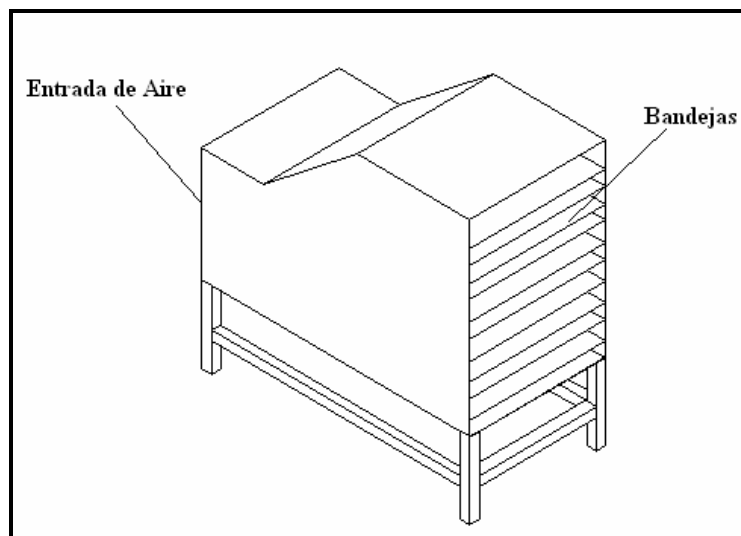


Fig. 3.3. Propuesta 3. (Fuente: Los Autores).

3.4.4 PROPUESTA 4: Secador de bandejas transportadas por rodillos y flujo paralelo

Esta propuesta tiene como característica trasladar las bandejas como un conjunto por medio de rodillos transportadores. Su funcionamiento es similar al secador propuesto en la propuesta 3. La Fig. 3.4 representa esta alternativa de secador.

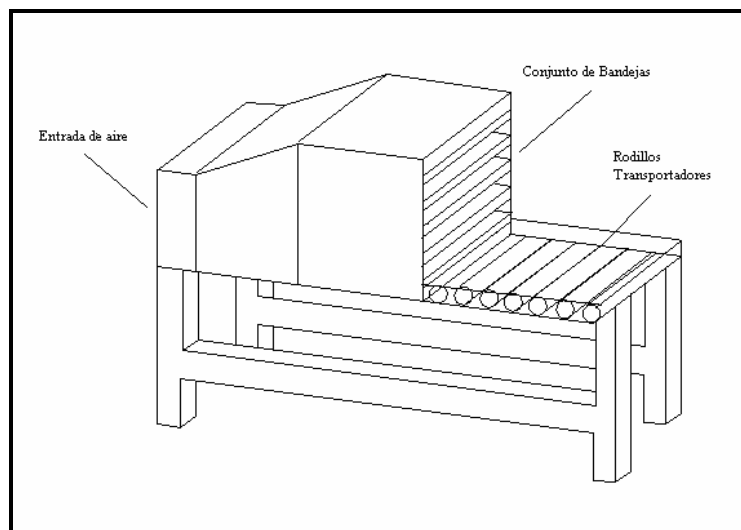


Fig. 3.4. Propuesta 4. (Fuente: Los Autores)

3.4.5 PROPUESTA 5: Secador de bandejas transportadas por rodillos y flujo perpendicular

En esta idea, la bandeja es trasladada a la cámara de secado por rodillos transportadores, el ventilador y la resistencia se encuentran ubicados en la parte superior de la secadora. Esta propuesta está representada por la Fig. 3.5:

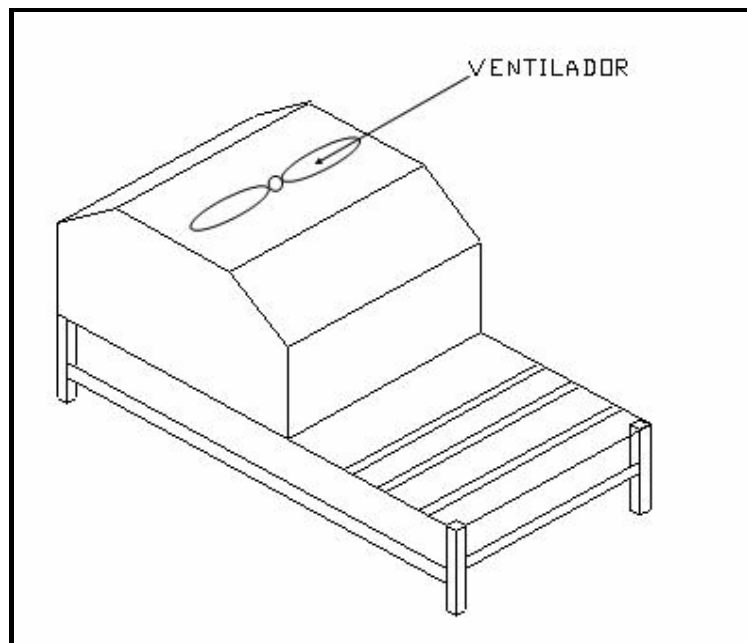


Fig. 3.5. Propuesta 5. (Fuente: Los Autores).

3.5 ESTUDIO PRELIMINAR DE COSTOS

Un análisis inicial comprende una recopilación de costos de los elementos tentativos del sistema, apoyándonos en solicitudes de cotizaciones, en la experiencia adquirida y ayuda de personal calificado en el área.

Ya que el sistema no ha sido diseñado, sino se encuentra en la parte de bosquejos sencillos, sólo se tomarán en cuenta aquellos elementos que se consideren importantes. Estos elementos se calificarán de acuerdo a una ponderación de costos, donde 1 significa el elemento menos costoso y 10 el elemento más costoso, para así poder tener una posición bien clara y más objetiva al momento de valorar el sistema en el análisis morfológico de los diseños en cuestión. Los resultados están expresados en la Tabla 3.1.

Elemento (1 unidad)	Ponderación
Banda Transportadora	10
Resistencias eléctricas	4
Motor eléctrico	6
Ventilador	8
Vigas (m)	2
Cadena	3
Rodillos transportadores	9
Sistema de control	4
Planchas metálicas	2
Cables	1
Rodamientos	2

Tabla 3.1. Ponderación de costos. (Fuente: Los Autores)

3.6 ANÁLISIS MORFOLÓGICO

3.6.1 PARÁMETROS PARA LA SELECCIÓN DE LAS OPCIONES

Consiste en seleccionar los parámetros más importantes a considerar para obtener el sistema de secado óptimo asignándole un valor porcentual a cada factor según su importancia, y apoyándonos en opiniones de personas involucradas con el proceso de una u otra manera para así poder llegar a una solución acertada al problema planteado.

Los factores a considerar en la Matriz Morfológica son los siguientes:

- *Costo energético*: Es el costo de la energía que necesita el equipo para funcionar.
- *Costo del equipo*: Es la inversión inicial necesaria para la adquisición del equipo, esta incluye transporte, montaje y accesorios de equipos eléctricos necesarios para la funcionabilidad del sistema, además de los elementos estructurales que lo componen.
- *Rendimiento*: Mide la cantidad de alimento que es capaz de secarse en un tiempo determinado. El material ha de ser distribuido y transportado de forma sencilla a lo largo de la cámara de secado, a una velocidad adecuada sin realizar retrasos en la línea de producción.
- *Costo de mantenimiento*: Gasto económico realizado al equipo durante su vida útil para que este opere dentro de los parámetros de diseño.
- *Espacio ocupado y adaptabilidad*: El espacio ocupado se refiere al tamaño del equipo y la zona disponible para la instalación de éste. La adaptabilidad se refiere a la capacidad del equipo de adaptarse a las limitaciones existentes realizando la menor cantidad de cambios.

- *Disponibilidad:* Se refiere a la existencia de los equipos que conforman el sistema en el mercado. En el momento de realización y concepción de un diseño se debe considerar los elementos que van a constituir dicho sistema o máquina, ya que los elementos seleccionados deben ser comercialmente accesibles, para no elevar el costo de construcción al tener que adquirir los elementos en otra parte del país o fuera de él.
- *Ergonomía:* La ergonomía se encarga de optimizar los sistemas hombre-máquina buscando la adaptación de la máquina al hombre, preservando a este en su salud. Se debe tomar en cuenta un parámetro importante el cual es diseñar un equipo basado en la ergonomía y comodidad del operario y/o trabajador presente en el proceso que este realiza, tal que no debe perturbar el proceso productivo, ni debe incomodar a los trabajadores al operar la máquina o circular cerca de ella.
- *Grado de automatización:* Es el grado de utilización de procedimientos automáticos de un aparato, proceso o sistema, para facilitar la operabilidad de los equipos y disminuir al mínimo posible el contacto entre el hombre y la máquina.
- *Durabilidad:* Tiempo de vida útil del sistema.
- *Seguridad:* La seguridad del sistema está enfocada en evitar una falla cuando éste se encuentra en funcionamiento. Esta seguridad implica que todo lo cercano al sistema no debe estar en riesgo, lo que involucra tanto al personal como a las máquinas adyacentes en la línea de producción, esto acarrearía pérdidas de tiempo traducéndose en costos adicionales de producción. Además la seguridad comprende evitar accidentes, tomando en cuenta el contacto entre el sistema y el personal operativo.
- *Versatilidad:* Representa cuan adaptable a cambios futuros en el proceso es un sistema, y cuan moldeable es el mismo.

Para realizar la evaluación de cada solución propuesta se toma en cuenta la siguiente escala de puntuación:

- Deficiente: 1
- Aceptable: 2
- Bueno: 3
- Muy bueno: 4
- Excelente: 5

Luego, para obtener el valor final, se multiplica la puntuación anterior de cada solución por el asignado en porcentaje y se suman todos los resultados para así obtener el total a comparar entre los distintos sistemas.

3.6.2 MATRIZ MORFOLÓGICA

PARÁMETROS	PESO (%)	IDEA #1	IDEA #2	IDEA #3	IDEA #4	IDEA #5
Costo Energético	10	2	2	3	3	3
Costo del Equipo	20	2	2	5	4	4
Rendimiento	15	4	5	3	3	3
Costo de Mantenimiento	10	3	3	5	4	4
Espacio ocupado y Adaptabilidad	10	3	4	4	4	4
Disponibilidad en el Mercado	5	4	4	5	5	5
Ergonomía y Seguridad	10	4	4	4	4	4
Grado de Automatización	5	4	4	2	2	2
Durabilidad	10	3	3	5	4	4
Versatilidad	5	2	2	5	5	4
TOTAL	100	31	33	41	38	37

Tabla 3.2: Matriz Morfológica. (Fuente: Los Autores)

3.7 CONCLUSIONES DEL DISEÑO METODOLÓGICO

De la evaluación de la matriz morfológica, se puede observar que la alternativa 3, fue la que obtuvo la mayor puntuación, según los criterios de evaluación definidos, por tanto se considera ésta como la mejor solución al problema planteado.

El diseño y construcción de este secador de bandejas es sencillo, sin componentes complicados y de fácil mantenimiento. Las piezas que componen el equipo son económicas y se adquieren en todo el país, su proceso de manufactura es sencillo y tanto la instalación como la operación de las mismas pueden ser efectuadas sin muchos contratiempos.

Aunque es un equipo prácticamente manual y con rendimiento medio, permite adaptarse a diferentes tipos de alimentos y de gran versatilidad para realizar cambios en su estructura.

CÁLCULOS Y DISEÑO

4.1 SELECCIÓN DEL TIPO DE SECADOR

Para la selección del método de secado, así como el tipo de secador se procedió a considerar las condiciones ambientales de la zona donde se va a instalar el equipo, luego, y con ayuda de la teoría investigada se realizó una tormenta de ideas tomando en cuenta diversos parámetros, para luego aplicarles un análisis morfológico.

De acuerdo con las características del producto a secar, ubicación y consumidor final, hemos decidido utilizar el secador de bandejas como el modelo que se adapte mejor a las necesidades de la zona. Su diseño y construcción es sencillo, sin componentes complicados y de fácil mantenimiento.

4.2 DETERMINACIÓN Y CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO

En el diseño de los secadores, los parámetros de secado principales son los siguientes:

4.2.1 TEMPERATURA DE AIRE DE SECADO

La temperatura de operación del secador se restringe por la temperatura que resiste el alimento sin perder sus propiedades alimenticias, ni propiciar fenómenos como el empardeamiento y encostramiento. Esta temperatura del aire de secado oscila entre 30 y 80°C (depende del alimento) para el diseño del equipo, y se utiliza

como medio de calentamiento resistencias eléctricas las cuales van a ser seleccionadas para tal fin. Adicional a esto se conecta un termostato el cual permite controlar la temperatura dentro del equipo.

4.2.2 HUMEDAD FINAL DEL PRODUCTO

La humedad máxima final del producto se encuentra en el orden del 12,5 % según *Norma COVENIN 1156-79* de alimentos para animales. Con este porcentaje de humedad final se evita el desarrollo de hongos y/o bacterias que son perjudiciales para el alimento.

4.2.3 HUMEDAD RELATIVA DEL AIRE

La humedad relativa del aire varía de acuerdo a las condiciones ambientales del lugar de trabajo. Para nuestro diseño, se tomó la condición más desfavorable del año 2003 en la zona de Puerto Ayacucho, según los *Datos Climatológicos Región Amazonas* (ANEXO 3), proporcionada por la Fuerza Aérea Venezolana. El valor tomado para nuestro diseño es de 80% de humedad relativa y de 25,7 °C de temperatura ambiental.

4.2.4 PRESIÓN

El secado se produce a una presión constante dentro del secador y es aproximadamente igual a la presión atmosférica, ya que el ventilador a seleccionar no produce una elevación significativa de este parámetro.

4.2.5 HUMEDADES CARACTERÍSTICAS

Para hallar estos datos se realizaron ensayos del alimento con una estufa proporcionada por FUDECI en Pto. Ayacucho (Fig. 4.1), construyendo la curva de secado Humedad vs. Tiempo (Fig. 4.2).



Fig. 4.1 Estufa. (Fuente: Los Autores)

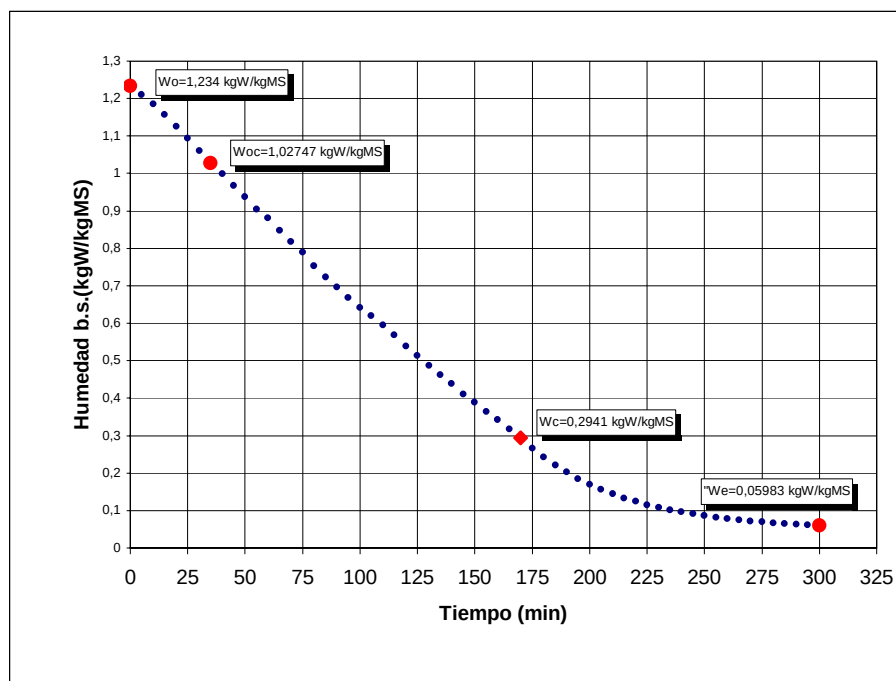


Fig. 4.2 Humedad vs. Tiempo. (Fuente: Los Autores)

De la curva *Humedad vs Tiempo*, se obtienen los siguientes datos:

1. Humedad inicial (W_o): 1,234 kgW/kgMS
2. Humedad inicial período constante (W_{oc}): 1,0274 kgW/kgMS
3. Humedad crítica (W_c): 0,2947 kgW/kgMS
4. Humedad de equilibrio (W_e): 0,05983 kgW/kgMS

4.3 DISEÑO Y/O SELECCIÓN DE LOS COMPONENTES

4.3.1 ESTRUCTURA

Una vez desarrollado y seleccionado el sistema a utilizar es indispensable buscar y determinar los materiales que se van a emplear, tomando en cuenta que el producto a secar está destinado a consumo animal.

El principal parámetro para el cálculo de la estructura es la capacidad de la unidad secadora, la misma está diseñada para secar 30 kg. de alimento dispuesto en 10 bandejas las cuales contienen 3 kg. cada una. Por ser un prototipo de secador de alimento para consumo animal, el mismo puede ser fabricado en acero estructural ASTM A-36, revestido con fondo de herrería resistente a altas temperaturas y humedades. Los materiales del prototipo se encuentran en la Tabla 4.1:

Los planos de la estructura del secador se encuentran en el ANEXO 1 y las características adicionales de los materiales utilizados para el prototipo se encuentran en el ANEXO 4.

PRODUCTO	CALIDAD	MEDIDAS	ESPESOR
<i>Tubería Cuadrada</i>	ASTM A-36 Laminado en frío	1*1 plg.	0.9 mm
<i>Lámina de Acero</i>	ASTM A-36 Laminado en frío	1200*2400 mm.	1.20 mm.
<i>Ángulos (alas iguales)</i>	ASTM A-36	25 mm.	3 mm.
<i>Pletina</i>	ASTM A-36		
<i>Malla tipo Mosquitero</i>		2000*1000 mm.	

Tabla 4.1: Lista de Materiales. (Fuente: Los Autores)

4.3.2 VENTILADOR

Para la selección del ventilador, se toma en consideración el caudal y la presión de trabajo. En nuestro caso, se preselecciona un ventilador tomando como velocidad del aire en 3 m/s. y una sección transversal libre A_l que resulta de la diferencia del área del ducto menos el área ocupada por la sección transversal de cada una de las bandejas.

$$A_l = A_d - 10 * A_{td} \quad (4.1)$$

$$A_l = 0,33 - 10 * 0,0127 = 0,203 m^2$$

Por otra parte, el caudal de aire Q es:

$$Q = v * A_l \quad (4.2)$$

$$Q = 3 * 0,203 = 0,609 \frac{m^3}{s} \cong 1290 pcm$$

Se considera que no existen mayores pérdidas de presión debida a cambios de sección en ductos y codos, razón por la cual las pérdidas ocurren a nivel de la cámara de secado, específicamente sobre el producto y en los bordes de las bandejas. Por lo tanto, la caída de presión no debe exceder de $1/4$ de plg de agua para nuestro diseño.

Finalmente, el ventilador seleccionado posee las siguientes características:

- Caudal 1650 pcm ($0,7787 m^3/s$)
- Presión: $1/4 plg. H_2O$ ($62,2 Pa$).

Este ventilador corresponde al modelo Alpha 16-4T de la casa VENTILEX® (Fig.4.3). Sus detalles se encuentran en el ANEXO 5.



Fig 4.3 Ventilador Alpha 16-4T
(Fuente: VENTILEX)

Recalculando, para un Caudal de 1650 *pcm.*, el nuevo valor de la velocidad del aire:

$$v = \frac{0,7787}{0,203} = 3,83 \frac{m}{s}$$

Este valor de aire va a ser el utilizado en los cálculos posteriores para el resto del diseño.

4.3.3 RESISTENCIA ELÉCTRICA

Para la selección de la resistencia, primero se calculan los requerimientos de energía calorífica en *kW* por medio de la ec.(4.3) [18]:

$$P = Q * \rho_a * C_p * (T_{op} - T_a * F.S. \quad (4.3)$$

Para una temperatura de entrada (T_a) de 25,7 °C y de salida (T_{op}) de 35 °C., estimando un factor de seguridad de 5% para tolerar pérdidas de calor en el sistema, variaciones de voltaje y variaciones en la tasa de flujo, tenemos lo siguiente:

$$P = 0,7787 * 1,1449 * 1,006 * (35 - 25,7) * 1,05 = 8,92 kW$$

Considerando que el equipo va a estar aislado térmicamente, y suponiendo que no existen pérdidas entre las juntas que la componen, podemos decir que los requisitos totales de energía pueden aproximarse a 9000 *W*.

Una vez que las necesidades totales de energía calorífica han sido determinadas, la selección del tipo de calentador eléctrico se realiza tomando como base tres criterios:

- Temperatura máxima del forro metálico del elemento.
- Material del forro metálico.
- Densidad de potencia máxima recomendada.

Temperatura máxima del forro metálico: La temperatura del forro metálico de un elemento eléctrico debe ser limitada para prevenir daños al calentador y proporcionar una vida razonable. La temperatura máxima del forro metálico del elemento de calentamiento está determinada por la temperatura final de funcionamiento del proceso.

Material del forro metálico: El material del forro metálico del elemento es seleccionado basado en la temperatura máxima permisible para el forro metálico, el material que está siendo calentado y la resistencia a la corrosión necesaria. Las temperaturas máximas de forro metálico comunes se listan en la Tabla 4.2.

Densidad de potencia máxima recomendada: La densidad de potencia es representada por W/plg^2 y es el flujo de calor que emana cada pulgada cuadrada del área de calentamiento efectiva (superficie calentada) del elemento. El área de calentamiento efectiva es el área de superficie por pulgada lineal del calentador multiplicado por la longitud calentada. Si la densidad de potencia es muy alta, el material se carbonizará o sobrecalentará, lo que resultará en un daño para el equipo de calentamiento o el material que se está calentando.

MATERIAL	TEMPERATURA MÁXIMA
<i>Cobre</i>	177°C (350°F)
<i>Hierro</i>	399°C (750°F)
<i>Acero</i>	399°C (750°F)
<i>MONEL®</i>	482°C (900°F)
<i>Acero Cromo</i>	648°C (1200°F)
<i>Acero Inoxidable 300</i>	648°C (1200°F)
<i>INCOLOY®</i>	870°C (1600°F)
<i>INCONEL®</i>	926°C (1700°F)

Tabla 4.2. Temperaturas máximas de forro metálico. (Fuente: UL 1030).

La densidad de potencia para las resistencias fabricadas por INELCE (Guarenas – Venezuela) está en el orden de 29 W/plg^2 . Por lo tanto, hemos seleccionado la resistencia VRE-3000 de la misma casa fabricante, la cual tiene las siguientes características:

MODELO	VRE –3000.
Densidad de Potencia (ρ_p):	$29 \text{ W/plg}^2 (44950 \text{ W/m}^2)$
Largo Caliente (L_C):	$75 \text{ plg} (1,905 \text{ m})$
Diámetro (D_r):	$0.43 \text{ plg} (0,010922 \text{ m})$

Tabla 4.3. Características de la resistencia VRE-3000
(Fuente: INELCE)

Posteriormente, se verifica la potencia de la resistencia seleccionada por medio de la ec. (4.4) [18]:

$$P_r = \rho_p * L_c * \pi * D_r \quad (4.4)$$

$$P_r = 44950 * 1,905 * 3,1415 * 0,010922 = 2938,17W$$

Finalmente, el número de resistencias necesarias para los requerimientos caloríficos del sistema son los siguientes:

$$\text{Nº de resistencias} = \frac{P}{P_r} \quad (4.5)$$

$$\text{Nº de resistencias} = \frac{9000}{2938,17} \cong 3$$

Aproximando a un número de resistencias de 3, se seleccionan las resistencias VRE-3000 fabricadas por INELCE. La ubicación, así como sus características geométricas se encuentran el ANEXO 1.

4.3.4 SELECCIÓN DEL TERMOSTATO

Para controlar la temperatura en la cámara de secado, se utiliza un termostato de bulbo capilar de cobre. Éste posee un relé que apaga o enciende una de las tres resistencias cuando la temperatura registrada por el bulbo supera la temperatura del controlador. El rango de funcionamiento del termostato se ubica entre 20 y 120 °C.

4.3.5 SELECCIÓN DEL AISLANTE

El uso y aplicación del aislante térmico deberá cubrir los siguientes propósitos:

- *Control de la temperatura de proceso:* El espesor y tipo de aislante térmico seleccionado deberá preservar las condiciones de operación dentro de los límites de diseño para procesos.
- *Conservación de energía:* El espesor y tipo de aislante seleccionado representará el balance óptimo entre la inversión necesaria para la adquisición e instalación del sistema aislante y el abatimiento en los costos de operación, y será el suficiente para minimizar las pérdidas de energía por disipación al ambiente. Este criterio conlleva la tendencia a preservar el equilibrio de los ecosistemas y las reservas naturales de energéticos.
- *Protección al personal:* En procesos que ocurren a alta temperatura, el espesor y tipo de aislante seleccionado garantizará una temperatura de la superficie externa menor a 60°C .

4.3.5.1 CÁLCULO DE LA PÉRDIDA DE CALOR EN LA CÁMARA DE SECADO

La pérdida de calor superficial ocurre por convección libre en las paredes verticales, así como en el techo y piso (horizontales) de la cámara de secado.

Suposiciones:

- Condiciones de estado estable.
- Flujo de calor uniforme.
- Propiedades constantes.
- El aire en el exterior se encuentra en reposo.
- Efectos de radiación superficial despreciable.
- Temperatura de la pared interna del secador = 35 °C.
- Temperatura externa de la pared de la cámara de secado aproximadamente igual a la temperatura interna del secador=35 °C.
- Temperatura ambiente = 25,7 °C.

Cálculos:

Para el cálculo de la temperatura de película (T_f), se usará la ec. (4.6) [11]:

$$T_f = \frac{T_\infty + T_s}{2} \quad (4.6)$$

$$T_f = \left(\frac{298,7 + 308}{2} \right) = 303,35 K$$

Con T_f se buscan las propiedades del aire en el ANEXO 6. Las propiedades del aire para una temperatura de 303,35 K se encuentran en la Tabla (4.3):

$\nu [m^2/s]$	$\alpha [m^2/s]$	$k [W/m.K]$	$\beta [K^{-1}]$	Pr
$16,2 \cdot 10^{-6}$	$22,97 \cdot 10^{-6}$	$26,53 \cdot 10^{-3}$	0,0033	0,7066

Tabla 4.4. Propiedades del aire a 303,35 K.

(Fuente INCROPERA)

Con los datos de la Tabla 4.3, se calcula el número Raleigh, para convección libre con la ec. (4.7) :

$$Ra_l = \frac{g * \beta * (T_s - T_\infty) * L^3}{\nu * \alpha} \quad (4.7)$$

$$Ra_l = \frac{9,81 * 0,0033 * 9,3 * L^3}{16,2 * 10^{-6} * 22,97 * 10^{-6}} = 8,09 * 10^8 * L^3$$

Para las paredes verticales, tenemos que $H=L=0,66m$. De aquí, $Ra_l=2,326*10^8$. La capa límite de convección libre es laminar, entonces, para hallar el número de Nusselt para $Ra_l \leq 10^9$, se halla con la ec. (4.8):

$$\overline{Nu}_{l_s} = 0,68 + \frac{0,67 * Ra_l^{1/4}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{4/9}} \quad (4.8)$$

$$\overline{Nu}_{l_s} = 0,68 + \frac{0,67 * (2,326 * 10^8)^{1/4}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{0,7066} \right)^{9/16} \right]^{4/9}} = 64,15$$

El coeficiente de convección asociado con los lados es:

$$\overline{h}_s = \overline{Nu}_{l_s} * \frac{k}{H} \quad (4.9)$$

$$\overline{h}_s = 64,15 * \frac{26,53 * 10^{-3}}{0,66} = 2,57 \frac{W}{m^2.K}$$

Para las partes superior e inferior, $L = 0,5/2 = 0,25\text{m}$, $Ra_l = 1,26 \cdot 10^7$.

El número de Nusselt asociado al techo, para $10^7 < Ra_l < 10^{11}$ es:

$$\overline{Nu}_l = 0,15 * Ra_l^{1/3} \quad (4.10)$$

$$\overline{Nu}_l = 0,15 * (1,26 * 10^7)^{1/3} = 34,91$$

Sustituyendo en la ec. (4.9), el coeficiente de convección asociado al techo es:

$$\bar{h}_t = 3,708 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

El número de Nusselt asociado a la base, para $10^5 \leq Ra_l \leq 10^{10}$ es:

$$\overline{Nu}_{l_b} = 0,27 * Ra_l^{1/4} \quad (4.11)$$

$$\overline{Nu}_{l_b} = 0,27 * (1,26 * 10^7)^{1/4} = 16,1$$

Sustituyendo en la ec. (4.9), el coeficiente de convección asociado a la base es:

$$\bar{h}_b = 1,71 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

El calor perdido en la superficie de la cámara de secado q_p es:

$$q_p = 2 * q_s + q_t + q_b \quad (4.12)$$

Sustituyendo los valores de q_s , q_t y q_b en (4.12), tenemos que:

$$q_p = (2 * \bar{h}_s * A_s + \bar{h}_t * A_t + \bar{h}_b * A_b) * (T_s - T_\infty) \quad (4.13)$$

$$q_p = (2 * 2,57 * 0,66 + 3,708 * 0,5 + 1,71 * 0,5) * (35 - 25,7) = 56,74W$$

4.3.5.2 REDUCCIÓN DE LA PÉRDIDA DE CALOR EN LA CÁMARA DE SECADO

Para reducir la pérdida de calor, se usará una capa de 1 plg. de espesor de lana de vidrio ($k = 0,035 \text{ W/m}^2.K$) para envolver el ducto.

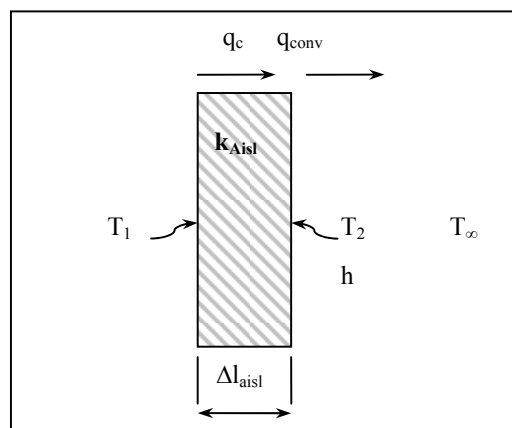


Fig.4.4. Transferencia de calor sobre una pared plana (Fuente: Los Autores)

La Fig. 4.5 representa la analogía eléctrica del sistema de la Fig. 4.4.

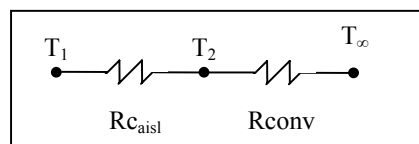


Fig. 4.5. Analogía eléctrica.

(Fuente: Los Autores)

La pérdida de calor en cada superficie es:

$$q = \frac{(T_1 - T_\infty)}{R_{c_{aisl}} + R_{conv}} \quad (4.14)$$

Aplicando un balance de energía en la superficie externa:

$$q_c = q_{conv} \quad (4.15)$$

Entonces:

$$\frac{T_1 - T_2}{\Delta l_{aisl} / k_{aisl}} = \frac{T_2 - T_\infty}{1 / \bar{h}} \quad (4.16)$$

Como $\bar{h}$ depende de T_2 , y cada temperatura en la superficie es diferente, los coeficientes de convección se hallan iterativamente, y los mismos se listan en la Tabla 4.5.

Lados	$T_2 = 302,4 \text{ K}$	$\bar{h}_s = 2,01 \text{ W/m}^2.K$
Parte Superior (Techo)	$T_2 = 302,7 \text{ K}$	$\bar{h}_t = 2,65 \text{ W/m}^2.K$
Parte Inferior (Base)	$T_2 = 303,2 \text{ K}$	$\bar{h}_b = 1,41 \text{ W/m}^2.K$

Tabla 4.5. T y $\bar{h}$ en la superficie del aislante.(Fuente: Los Autores)

Al ignorar las pérdidas de calor a través de las esquinas del aislante, la transferencia total de calor del ducto de la cámara de secado es:

$$q_t = 6,55W$$

Si comparamos el flujo de calor entre el sistema con aislante y sin aislante observamos que existe una reducción de 88.45%

4.4 TIEMPO DE SECADO TEÓRICO

Por medio de la ecuación (2.13), y usando los resultados de la Fig. 4.2, se calcula el tiempo de secado teórico para las condiciones de diseño ($T_{op} = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $V_a = 3.83\text{ m/s}$).

$$t_t = 164,23\text{ min} = 2\text{h}44\text{ min}$$

4.5 PESO DE LA ESTRUCTURA

El cálculo se realiza multiplicando la densidad lineal o superficial del material (ANEXO 4) por la longitud o área del material. A continuación se muestra el peso total del prototipo, especificando cada una de las partes que lo componen:

- Bandejas: (sin alimento y despreciando el peso de la malla de fondo)

$$\text{Peso de 1 bandeja} = 1,11 * 1 * 2 + 1,11 * 0,48 * 2 + 0,63 * 1 = 3,91\text{ kg}$$

Como 1 bandeja pesa 3,91 kg, entonces 10 bandejas pesan 39,1 kg.

- Soporte de bandejas (Ángulos)

$$\text{Peso de los rieles} = 1,11 * 1 * 20 = 22,2\text{ kg}$$

- Ducto de sección de calentamiento.

Por analogía de áreas:

$$2,88\text{ m}^2 \text{ pesan } 27,82\text{ kg}, \text{ por lo tanto } 1,45\text{ m}^2 \text{ pesan } 14,02\text{ kg}.$$

- Ducto sección de secado:

Utilizando el método anterior se obtiene que $2,32 \text{ m}^2$ pesan $22,41 \text{ kg}$.

- Armazón de la estructura (Tubería cuadrada).

Sección de calentamiento

$$(0,701)*(1)*(6)+(0,701)*(1,25)*(2)+(0,701)*(1,4)*2+(0,701)*(0,5)*5+(0,701)*(0,734)*4=11,73 \text{ kg}.$$

Sección de secado

$$(0,701)*(1)*(6)+(0,701)*(1,4)*4+(0,701)*(0,5)*4+(0,701)*(0,734)*4=11,59 \text{ kg}.$$

- Ventilador

Peso del ventilador 18 kg .

Sumando cada uno de estos cálculos obtenemos 139 kg . Si a esto le agregamos el peso de los accesorios como switches, termostato, resistencia y aislante, obtenemos un peso aproximado para el prototipo de 142 kg .

DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

5.1 GENERALIDADES

Este secador ha sido diseñado para secar 30 *kg.* de alimento para pato real. El sistema está compuesto por dos partes principales: sección de calentamiento y cámara de secado. En la sección de calentamiento se encuentran las 3 resistencias eléctricas generadoras de calor y de un ventilador axial para producir la circulación forzada de aire.

En la cámara de secado se encuentran localizadas cada una de las bandejas donde va a estar dispuesto el producto a secar. El prototipo está construido con materiales resistentes a la humedad y de fácil mantenimiento. A continuación se presentan algunas fotografías del prototipo:



Fig. 5.1 Vista general del prototipo.

(Fuente: Los Autores)



Fig. 5.2 Exterior de la sección de calentamiento. (Fuente: Los Autores)



Fig. 5.3 Posterior de la sección de calentamiento. (Fuente: Los Autores)



Fig. 5.4. Interior de la Sección de Calentamiento
(Fuente: Los Autores)



Fig. 5.5. Frente del Tablero Eléctrico
(Fuente: Los Autores)

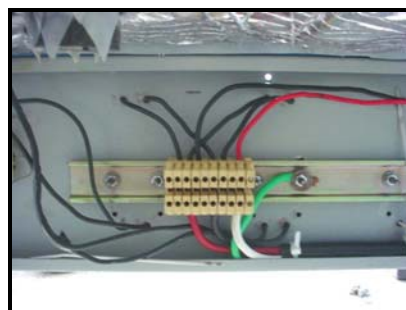


Fig. 5.6. Posterior del Tablero Eléctrico
(Fuente: Los Autores)

En las siguientes fotografías se muestra la cámara de secado, en las cuales se observan algunas bandejas (5) dispuestas en el secador (izquierda) y un acercamiento de la mismas (derecha).



Fig. 5.7. Cámara de Secado
(Fuente: Los Autores)



Fig. 5.8. Bandejas
(Fuente: Los Autores)

Finalmente, se presenta el prototipo, observándose el desarme de las dos partes principales que conforman el equipo.



Fig. 5.9. Desarme de las Secciones
(Fuente: Los Autores)

5.2 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

<i>VOLTAJE</i>	220 V TRIFÁSICA
<i>FRECUENCIA</i>	60 Hz
<i>PESO</i>	142 kg.
<i>VOLUMEN</i>	1.3 m ³

Tabla 5.1. Especificaciones Técnicas. (Fuente: Los Autores)

5.3 CONSUMO ELÉCTRICO DEL EQUIPO

EQUIPO	CANTIDAD	POTENCIA	INSTALACIÓN
<i>Ventilador</i>	1	0.50 Hp.	0.372 kW.
<i>Resistencia Eléctrica</i>	3	12.06 Hp.	9000 kW.

Tabla 5.2 Consumo Eléctrico del Equipo (Fuente: Los Autores)

RESULTADOS PRÁCTICOS

6.1 CONDICIONES AMBIENTALES

El ensayo de secado se realizó en el prototipo ubicado en la Estación Experimental FUDECI – Pto. Ayacucho el 15 de Abril de 2004, comenzando a las 10:00 am, bajo las siguientes condiciones atmosféricas:

HUMEDAD RELATIVA	62 %
TEMPERATURA AMBIENTAL	24,9 °C
PRESION ATMOSFÉRICA	111,8 kPa

Tabla 6.1. Condiciones Atmosféricas. (Fuente: Los Autores).

6.2 MATERIALES Y EQUIPOS

- Balanza digital.

Marca: OHAUS-SCOUT.

Capacidad: 200 gr.

Precisión: $\pm 0,001$ gr.



Fig. 6.1: Balanza digital.
(Fuente: Los Autores).

- Balanza analítica.

Marca: OHAUS.

Modelo: Triple Beam Balance.

Capacidad: 2610 gr.

Precisión: $\pm 0,1$ gr.



Fig. 6.2: Balanza Analítica.
(Fuente: Los Autores).

- Tri-sense.

Marca: TRISEVECA.

Temperatura máxima: 80 °C.

Precisión: $\pm 0,1$ °C.



Fig 6.3: Tri-Sense
(Fuente: Los Autores).

- Estufa.

Marca: FELISA.

Modelo: FE-291D.

Temperatura máxima: 220 °C.

Potencia: 750 W.

Voltaje: 120 V.



Fig. 6.4: Estufa.
(Fuente: Los Autores).

- Cronómetro

Precisión: $\pm 0,01$ s.

- Vaso de Precipitado de 600 ml.

- Cápsulas de Petri.

6.3 METODOLOGÍA DEL ENSAYO DE SECADO

Se prepararon 9,375 kg. de alimento a secar (Capítulo II).

Se prepararon 12 probetas (cápsulas de Petri) con una cantidad de alimento que oscila entre 30 y 60 gramos cada una, quedando capas de 0,5 plg. de espesor, aproximadamente.

Se midió el peso de cada probeta vacía y luego llena para calcular la diferencia y tener el peso de alimento de cada probeta. El resto del alimento se distribuyó en 3 bandejas del secador.

Se distribuyeron las probetas en 12 puntos del secador para determinar las diferencias de humedades y diferentes curvas de secado en dichos puntos (Fig. 6.5).

Se midió el peso de cada probeta en lapsos de 5 minutos durante 240 minutos. Finalmente se introdujeron las 12 probetas en una estufa graduada a 65 °C, durante 12 horas, para así determinar el peso del alimento seco.



Fig. 6.5. Distribución de las probetas. (Fuente: Los Autores)

6.4 METODOLOGÍA DEL ENSAYO DE TEMPERATURA

Paralelamente al ensayo de secado, transcurrida una hora del proceso (luego de calentar la cámara de secado) se comenzó a tomar y registrar las temperaturas sobre los puntos donde se ubicaron las probetas.

Probeta	1	2	3	4	5	6
Temperatura (°C)	33,0	34,4	33,1	33,1	34,3	33,0

Tabla 6.2A. Temperaturas (°C) a la entrada de la cámara de secado.

Probeta	7	8	9	10	11	12
Temperatura (°C)	32,8	33,9	33,0	32,9	33,9	33,0

Tabla 6.2B. Temperaturas (°C) a la salida de la cámara de secado.

6.5 RESULTADOS

La información recolectada permite realizar una serie de gráficas para lograr un análisis más conciso del comportamiento del secador en los diferentes puntos de control. En las Tablas 6.3A y 6.3B se registraron los datos tomados de Peso y Tiempo, para las distintas probetas, así como el peso de cada una de las muestras secas.

PESO PROBETAS 1 A 6 (Gramos)

T (min)	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4	Probeta 5	Probeta 6
0	39,292	33,126	40,299	38,088	50,703	40,866
5	38,489	32,549	39,510	37,093	49,433	40,049
10	37,677	31,964	38,711	36,089	48,152	39,222
15	37,164	31,472	38,177	35,243	47,456	38,709
20	36,642	30,972	37,634	34,388	46,748	38,187
25	35,987	30,423	37,015	33,662	45,939	37,624
30	35,324	29,866	36,387	32,928	45,118	37,053
35	34,768	29,097	35,732	32,145	44,202	36,214
40	34,204	28,321	35,068	31,355	43,276	35,366
45	33,534	27,729	34,392	30,664	42,338	34,697
50	32,857	27,130	33,708	29,965	41,390	34,019
55	32,273	26,623	33,088	29,345	40,644	33,492
60	31,681	26,110	32,460	28,718	39,888	32,956
65	31,032	25,567	31,847	28,084	39,070	32,337
70	30,377	25,018	31,227	27,442	38,244	31,709
75	29,728	24,476	30,621	26,843	37,468	31,075
80	29,072	23,927	30,008	26,237	36,684	30,433
85	28,592	23,540	29,501	25,752	36,015	29,912
90	28,080	23,147	28,987	25,259	35,338	29,384
95	27,571	22,770	28,507	24,841	34,754	28,890
100	27,031	22,368	27,995	24,395	34,133	28,364
105	26,549	22,039	27,528	23,990	33,577	27,897
110	26,039	21,687	27,031	23,558	32,985	27,400
115	25,602	21,359	26,620	23,309	32,478	26,961
120	25,160	21,007	26,181	23,034	31,936	26,493
125	24,745	20,697	25,822	22,533	31,479	26,113
130	24,324	20,383	25,458	22,028	31,014	25,727
135	24,005	20,058	25,044	21,712	30,634	25,329
140	23,685	19,727	24,625	21,391	30,248	24,925
145	23,433	19,538	24,388	21,199	29,960	24,676
150	23,180	19,364	24,171	21,023	29,696	24,449
155	23,009	19,204	23,972	20,860	29,454	24,239
160	22,794	19,058	23,788	20,710	29,232	24,047
165	22,672	18,923	23,619	20,571	29,027	23,870
170	22,505	18,799	23,463	20,443	28,839	23,707
175	22,376	18,684	23,319	20,324	28,666	23,557
180	22,234	18,579	23,186	20,214	28,505	23,419
185	22,193	18,482	23,063	20,112	28,358	23,291
190		18,392	22,950	20,017	28,221	23,172
195						

Peso 12%	22,44352	18,6051	23,37375	20,526	28,89898	23,51273
Peso seco	19,7503	16,3725	20,5689	18,0629	25,4311	20,6912

Tabla 6.3A Peso de la muestras. (Fuente: Los Autores)

PESO PROBETAS 7 A 12 (Gramos)

T (min)	Probeta 7	Probeta 8	Probeta 9	Probeta 10	Probeta 11	Probeta 12
0	62,029	34,062	29,866	33,467	50,278	34,147
5	61,143	33,534	28,906	32,684	49,731	33,520
10	60,243	32,999	27,938	31,893	49,172	32,885
15	59,598	32,698	27,446	31,358	48,639	32,308
20	58,939	32,389	26,946	30,816	48,095	31,723
25	58,372	31,954	26,574	30,486	47,782	31,316
30	57,791	31,510	26,195	30,150	47,457	30,901
35	57,082	31,089	25,716	29,650	46,967	30,274
40	56,359	30,660	25,231	29,143	46,465	29,639
45	55,614	30,203	24,759	28,608	46,010	28,984
50	54,856	29,739	24,281	28,066	45,544	28,321
55	54,211	29,388	23,887	27,630	44,883	27,871
60	53,552	29,030	23,488	27,187	44,211	27,414
65	52,843	28,615	23,051	26,708	43,493	26,857
70	52,121	28,194	22,609	26,223	42,765	26,294
75	51,390	27,729	22,193	25,759	42,288	25,759
80	50,646	27,258	21,772	25,288	41,801	25,217
85	49,965	26,907	21,442	24,887	41,239	24,809
90	49,271	26,549	21,106	24,480	40,667	24,395
95	48,624	26,188	20,770	24,075	40,236	23,982
100	47,925	25,798	20,412	23,644	39,760	23,544
105	47,270	25,436	20,111	23,273	39,257	23,160
110	46,564	25,047	19,788	22,878	38,711	22,750
115	45,916	24,755	19,480	22,479	38,144	22,387
120	45,217	24,437	19,150	22,056	37,535	21,999
125	44,641	24,128	18,911	21,754	37,036	21,661
130	44,055	23,814	18,668	21,446	36,528	21,319
135	43,553	23,534	18,356	21,188	36,002	21,026
140	43,041	23,250	18,040	20,925	35,468	20,729
145	42,609	23,013	17,864	20,704	35,057	20,516
150	42,206	22,791	17,701	20,500	34,676	20,321
155	41,832	22,583	17,550	20,312	34,321	20,140
160	41,483	22,389	17,411	20,138	33,990	19,974
165	41,158	22,207	17,282	19,977	33,682	19,821
170	40,855	22,036	17,162	19,828	33,394	19,679
175	40,571	21,876	17,051	19,690	33,124	19,548
180	40,306	21,725	16,948	19,562	32,872	19,426
185	40,058	21,583	16,851	19,443	32,635	19,314
190	39,825	21,450	16,762	19,332	32,414	19,209
195	39,607	21,325	16,678	19,229	32,206	19,112
200	39,403	21,206	16,601	19,133	32,011	
205	39,211	21,095		19,044	31,828	
210		20,989			31,655	
215		20,890			31,493	
220		20,796			31,340	
225		20,708			31,197	
230		20,624				
235		69,475				

Peso 12%	39,50909	20,47807	16,6163	19,031591	31,149886	19,13398
Peso seco	34,768	18,0207	14,6223	16,7478	27,4119	16,8379

Tabla 6.3B Peso de la muestras. (Fuente: Los Autores)

6.5.1 CURVAS DE SECADO

Mediante la definición de humedad en base húmeda y utilizando los datos de las Tablas 6.3A y 6.3B se obtiene la Tabla 6.4A y 6.4B. de humedades base húmeda de las muestras..

HUMEDADES PROBETAS 1 A 6 (%)

T (min)	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4	Probeta 5	Probeta 6
0	0,497	0,506	0,490	0,526	0,498	0,494
5	0,487	0,497	0,479	0,513	0,486	0,483
10	0,476	0,488	0,469	0,499	0,472	0,472
15	0,469	0,480	0,461	0,487	0,464	0,465
20	0,461	0,471	0,453	0,475	0,456	0,458
25	0,451	0,462	0,444	0,463	0,446	0,450
30	0,441	0,452	0,435	0,451	0,436	0,442
35	0,432	0,437	0,424	0,438	0,425	0,429
40	0,423	0,422	0,413	0,424	0,412	0,415
45	0,411	0,410	0,402	0,411	0,399	0,404
50	0,399	0,397	0,390	0,397	0,386	0,392
55	0,388	0,385	0,378	0,384	0,374	0,382
60	0,377	0,373	0,366	0,371	0,362	0,372
65	0,364	0,360	0,354	0,357	0,349	0,360
70	0,350	0,346	0,341	0,342	0,335	0,347
75	0,336	0,331	0,328	0,327	0,321	0,334
80	0,321	0,316	0,315	0,312	0,307	0,320
85	0,309	0,304	0,303	0,299	0,294	0,308
90	0,297	0,293	0,290	0,285	0,280	0,296
95	0,284	0,281	0,278	0,273	0,268	0,284
100	0,269	0,268	0,265	0,260	0,255	0,271
105	0,256	0,257	0,253	0,247	0,243	0,258
110	0,242	0,245	0,239	0,233	0,229	0,245
115	0,229	0,233	0,227	0,225	0,217	0,233
120	0,215	0,221	0,214	0,212	0,204	0,219
125	0,202	0,209	0,203	0,198	0,192	0,208
130	0,188	0,197	0,192	0,180	0,180	0,196
135	0,177	0,183	0,179	0,168	0,170	0,183
140	0,166	0,170	0,165	0,156	0,159	0,170
145	0,157	0,162	0,157	0,148	0,151	0,162
150	0,148	0,154	0,149	0,141	0,144	0,154
155	0,142	0,147	0,142	0,134	0,137	0,146
160	0,134	0,141	0,135	0,128	0,130	0,140
165	0,129	0,135	0,129	0,122	0,124	0,133
170	0,122	0,129	0,123	0,116	0,118	0,127
175	0,117	0,124	0,118	0,111	0,113	0,122
180	0,112	0,119	0,113	0,106	0,108	0,116
185	0,110	0,114	0,108	0,102	0,103	0,112
190		0,110	0,104	0,098	0,099	0,107
195						
200						

Tabla 6.4A Humedades base húmeda de las probetas. (Fuente: Los Autores)

HUMEDADES PROBETAS 7 A 12 (%)

T (min)	Probeta 7	Probeta 8	Probeta 9	Probeta 10	Probeta 11	Probeta 12
0	0,439	0,471	0,510	0,500	0,455	0,507
5	0,431	0,463	0,494	0,488	0,449	0,498
10	0,423	0,454	0,477	0,475	0,443	0,488
15	0,417	0,449	0,467	0,466	0,436	0,479
20	0,410	0,444	0,457	0,457	0,430	0,469
25	0,404	0,436	0,450	0,451	0,426	0,462
30	0,398	0,428	0,442	0,445	0,422	0,455
35	0,391	0,420	0,431	0,435	0,416	0,444
40	0,383	0,412	0,420	0,425	0,410	0,432
45	0,375	0,403	0,409	0,415	0,404	0,419
50	0,366	0,394	0,398	0,403	0,398	0,405
55	0,359	0,387	0,388	0,394	0,389	0,396
60	0,351	0,379	0,377	0,384	0,380	0,386
65	0,342	0,370	0,366	0,373	0,370	0,373
70	0,333	0,361	0,353	0,361	0,359	0,360
75	0,323	0,350	0,341	0,350	0,352	0,346
80	0,314	0,339	0,328	0,338	0,344	0,332
85	0,304	0,330	0,318	0,327	0,335	0,321
90	0,294	0,321	0,307	0,316	0,326	0,310
95	0,285	0,312	0,296	0,304	0,319	0,298
100	0,275	0,301	0,284	0,292	0,311	0,285
105	0,264	0,292	0,273	0,280	0,302	0,273
110	0,253	0,281	0,261	0,268	0,292	0,260
115	0,243	0,272	0,249	0,255	0,281	0,248
120	0,231	0,263	0,236	0,241	0,270	0,235
125	0,221	0,253	0,227	0,230	0,260	0,223
130	0,211	0,243	0,217	0,219	0,250	0,210
135	0,202	0,234	0,203	0,210	0,239	0,199
140	0,192	0,225	0,189	0,200	0,227	0,188
145	0,184	0,217	0,181	0,191	0,218	0,179
150	0,176	0,209	0,174	0,183	0,209	0,171
155	0,169	0,202	0,167	0,175	0,201	0,164
160	0,162	0,195	0,160	0,168	0,194	0,157
165	0,155	0,189	0,154	0,162	0,186	0,150
170	0,149	0,182	0,148	0,155	0,179	0,144
175	0,143	0,176	0,142	0,149	0,172	0,139
180	0,137	0,171	0,137	0,144	0,166	0,133
185	0,132	0,165	0,132	0,139	0,160	0,128
190	0,127	0,160	0,128	0,134	0,154	0,123
195	0,122	0,155	0,123	0,129	0,149	0,119
200	0,118	0,150	0,119	0,125	0,144	
205	0,113	0,146		0,121	0,139	
210		0,141			0,134	
215		0,137			0,130	
220		0,133			0,125	
225		0,130			0,121	
230		0,126				
235		0,123				

Tabla 6.4B Humedades base húmeda de las probetas. (Fuente: Los Autores)

Utilizando la definición de humedad en base seca se construye la tabla 6.5, y con los datos de esta tabla se genera la gráfica de Humedad vs. Tiempo (Fig. 6.6), distinguiendo que existen 3 zonas claramente definidas. La primera es la zona de “estabilización”, donde en algunos casos el alimento ingresa al secador con una temperatura menor que la de secado. La segunda es la zona de velocidad de secado constante y, finalmente la zona de velocidad de secado decreciente.

Así mismo, se pueden distinguir los puntos singulares de cada curva como humedad inicial (W_o), humedad inicial al comienzo del período constante (W_{oc}), humedad crítica (W_c) y humedad final (W_f).

En la Fig. 6.6 se muestra la gráfica obtenida de Humedad base seca vs. Tiempo para la probeta 2. El resto de las probetas se comporta de manera similar, por lo que no se ilustran en este trabajo.

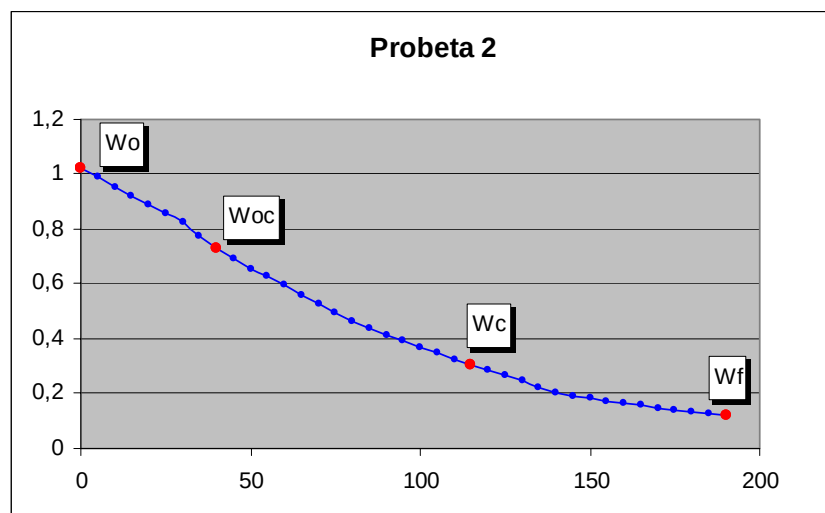


Fig. 6.6 Curva Humedad base seca ($kgW/kgMS$) vs. Tiempo (min) (Probeta 2)
(Fuente: Los Autores).

Igualmente, se presentan las curvas de humedad base húmeda ($kgW/kgMH$) vs. Tiempo (min) para el resto de las probetas. (Fig. 6.7A y 6.7B) utilizando las tablas 6.4A y 6.4B.

HUMEDADES B.S. PROBETAS 1 A 6 (KgW/KgMS)

T (min)	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4	Probeta 5	Probeta 6
0	0,989	1,023	0,959	1,109	0,994	0,975
5	0,949	0,988	0,921	1,054	0,944	0,936
10	0,908	0,952	0,882	0,998	0,893	0,896
15	0,882	0,922	0,856	0,951	0,866	0,871
20	0,855	0,892	0,830	0,904	0,838	0,846
25	0,822	0,858	0,800	0,864	0,806	0,818
30	0,789	0,824	0,769	0,823	0,774	0,791
35	0,760	0,777	0,737	0,780	0,738	0,750
40	0,732	0,730	0,705	0,736	0,702	0,709
45	0,698	0,694	0,672	0,698	0,665	0,677
50	0,664	0,657	0,639	0,659	0,628	0,644
55	0,634	0,626	0,609	0,625	0,598	0,619
60	0,604	0,595	0,578	0,590	0,568	0,593
65	0,571	0,562	0,548	0,555	0,536	0,563
70	0,538	0,528	0,518	0,519	0,504	0,532
75	0,505	0,495	0,489	0,486	0,473	0,502
80	0,472	0,461	0,459	0,453	0,442	0,471
85	0,448	0,438	0,434	0,426	0,416	0,446
90	0,422	0,414	0,409	0,398	0,390	0,420
95	0,396	0,391	0,386	0,375	0,367	0,396
100	0,369	0,366	0,361	0,351	0,342	0,371
105	0,344	0,346	0,338	0,328	0,320	0,348
110	0,318	0,325	0,314	0,304	0,297	0,324
115	0,296	0,305	0,294	0,290	0,277	0,303
120	0,274	0,283	0,273	0,275	0,256	0,280
125	0,253	0,264	0,255	0,247	0,238	0,262
130	0,232	0,245	0,238	0,219	0,220	0,243
135	0,215	0,225	0,218	0,202	0,205	0,224
140	0,199	0,205	0,197	0,184	0,189	0,205
145	0,186	0,193	0,186	0,174	0,178	0,193
150	0,174	0,183	0,175	0,164	0,168	0,182
155	0,165	0,173	0,165	0,155	0,158	0,171
160	0,154	0,164	0,157	0,147	0,149	0,162
165	0,148	0,156	0,148	0,139	0,141	0,154
170	0,139	0,148	0,141	0,132	0,134	0,146
175	0,133	0,141	0,134	0,125	0,127	0,139
180	0,126	0,135	0,127	0,119	0,121	0,132
185	0,124	0,129	0,121	0,113	0,115	0,126
190		0,123	0,116	0,108	0,110	0,120
195						
200						
205						
210						
215						
220						
225						
230						
235						

Tabla 6.5A. Humedad base seca vs. Tiempo. (Fuente: Los Autores).

HUMEDADES B.S. PROBETAS 7 A 12 (KgW/KgMS)

T (min)	Probeta 7	Probeta 8	Probeta 9	Probeta 10	Probeta 11	Probeta 12
0	0,784	0,890	1,043	0,998	0,834	1,028
5	0,759	0,861	0,977	0,952	0,814	0,991
10	0,733	0,831	0,911	0,904	0,794	0,953
15	0,714	0,814	0,877	0,872	0,774	0,919
20	0,695	0,797	0,843	0,840	0,755	0,884
25	0,679	0,773	0,817	0,820	0,743	0,860
30	0,662	0,749	0,791	0,800	0,731	0,835
35	0,642	0,725	0,759	0,770	0,713	0,798
40	0,621	0,701	0,726	0,740	0,695	0,760
45	0,600	0,676	0,693	0,708	0,678	0,721
50	0,578	0,650	0,661	0,676	0,661	0,682
55	0,559	0,631	0,634	0,650	0,637	0,655
60	0,540	0,611	0,606	0,623	0,613	0,628
65	0,520	0,588	0,576	0,595	0,587	0,595
70	0,499	0,565	0,546	0,566	0,560	0,562
75	0,478	0,539	0,518	0,538	0,543	0,530
80	0,457	0,513	0,489	0,510	0,525	0,498
85	0,437	0,493	0,466	0,486	0,504	0,473
90	0,417	0,473	0,443	0,462	0,484	0,449
95	0,399	0,453	0,420	0,437	0,468	0,424
100	0,378	0,432	0,396	0,412	0,450	0,398
105	0,360	0,411	0,375	0,390	0,432	0,375
110	0,339	0,390	0,353	0,366	0,412	0,351
115	0,321	0,374	0,332	0,342	0,391	0,330
120	0,301	0,356	0,310	0,317	0,369	0,307
125	0,284	0,339	0,293	0,299	0,351	0,286
130	0,267	0,321	0,277	0,281	0,333	0,266
135	0,253	0,306	0,255	0,265	0,313	0,249
140	0,238	0,290	0,234	0,249	0,294	0,231
145	0,226	0,277	0,222	0,236	0,279	0,218
150	0,214	0,265	0,211	0,224	0,265	0,207
155	0,203	0,253	0,200	0,213	0,252	0,196
160	0,193	0,242	0,191	0,202	0,240	0,186
165	0,184	0,232	0,182	0,193	0,229	0,177
170	0,175	0,223	0,174	0,184	0,218	0,169
175	0,167	0,214	0,166	0,176	0,208	0,161
180	0,159	0,206	0,159	0,168	0,199	0,154
185	0,152	0,198	0,152	0,161	0,191	0,147
190	0,145	0,190	0,146	0,154	0,182	0,141
195	0,139	0,183	0,141	0,148	0,175	0,135
200	0,133	0,177	0,135	0,142	0,168	
205	0,128	0,171		0,137	0,161	
210		0,165			0,155	
215		0,159			0,149	
220		0,154			0,143	
225		0,149			0,138	
230		0,144				
235		0,140				

Tabla 6.5B. Humedad base seca vs. Tiempo. (Fuente: Los Autores).

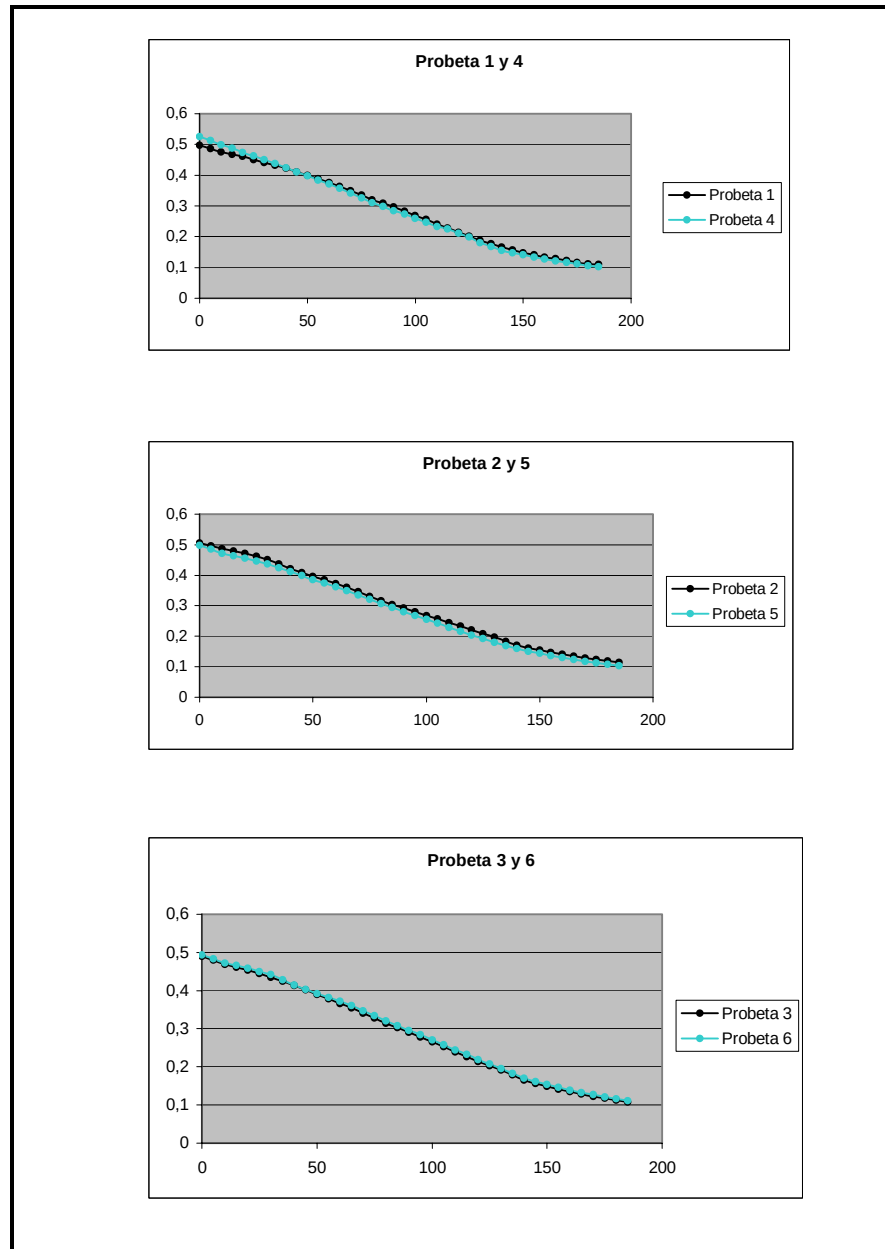


Fig 6.7 A. Humedad base húmeda ($kgW/100kgMH$) vs. Tiempo (min)

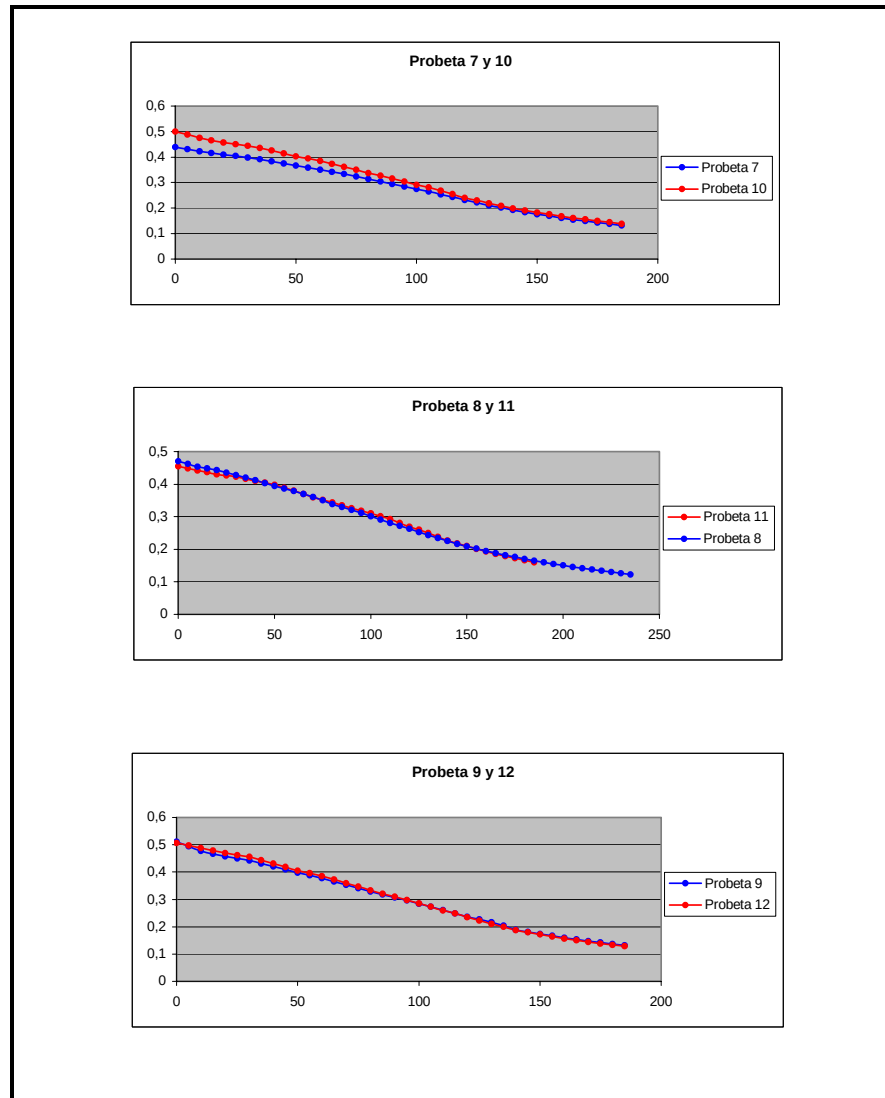


Fig 6.7B. Humedad base húmeda ($kgW/100kgMH$) vs. Tiempo (min)

Las humedades de entrada al secador no son iguales en todas las probetas dado que el alimento pierde humedad entre los lapsos que transcurren mientras se montan cada una de las probetas. Algo similar ocurre con las temperaturas.

6.5.2 GRÁFICA VELOCIDAD DE SECADO VS. HUMEDAD

Con los datos de humedad de la Tabla 6.5 y la definición de la Tasa de secado R , se construye la curva Tasa de secado vs. Humedad. (Fig. 6.8). En esta figura, se muestra la curva de Tasa de Secado vs. Humedad de una de las probetas ensayadas, a manera de muestra. El resto de las curvas se comporta de manera similar, así que no se incluyeron en este trabajo.

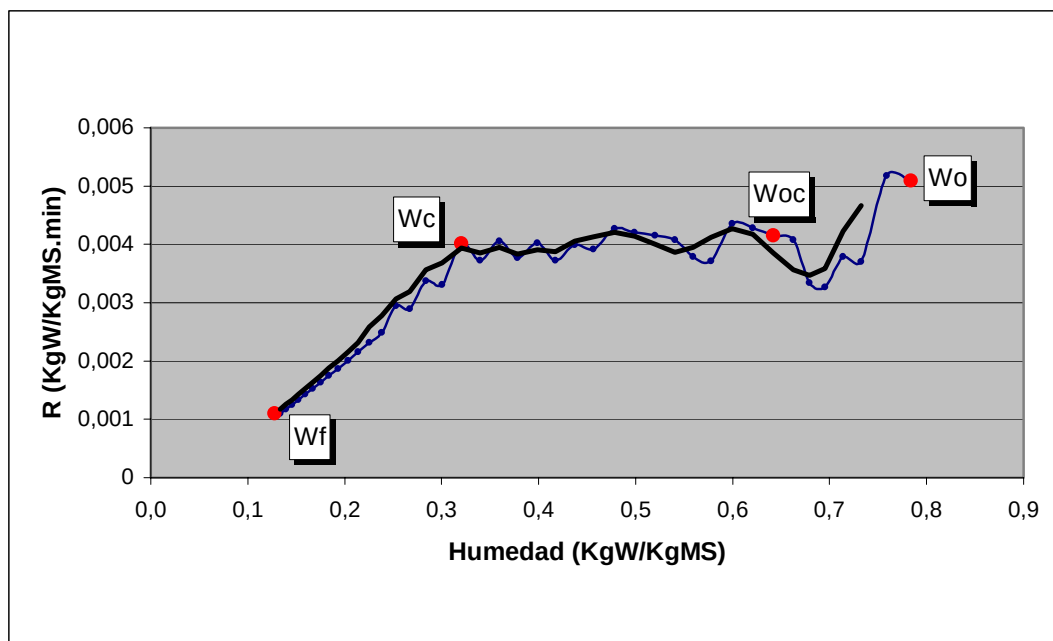


Fig. 6.8. Curva Tasa de secado vs. Humedad. (Fuente: Los Autores).

En la Fig. 6.8, se pueden distinguir dos zonas claramente definidas, la zona de tasa de secado decreciente, que va de W_c a W_f , así como la zona de tasa de secado constante, que va de W_{oa} hasta W_c . También se nota una pequeña zona de W_o a W_{oc} , algo inestable. Esta zona inicial es la zona de inducción, o de ajuste inicial.

6.5.3 TASA DE SECADO CONSTANTE

La tasa de secado constante R_c teórica se calcula con la ec. (2.4), para una temperatura de aire a 35°C , y la tasa de secado constante R_c práctica se calcula con la pendiente de la recta que mejor se ajusta a los datos de Humedad vs. Tiempo en la sección de tasa de secado constante (Tabla 6.5). En la Tabla 6.6 se lista los resultados en kgW/min de dichos cálculos:

PROBETAS	Rn (teórico)	Rn (práctico)
1	0,00657	0,00570
2	0,00796	0,00540
3	0,00631	0,00520
4	0,00720	0,00670
5	0,00510	0,00570
6	0,00627	0,00520
7	0,00373	0,00300
8	0,00720	0,00430
9	0,00888	0,00520
10	0,00775	0,00540
11	0,00474	0,00390
12	0,00771	0,00560
Promedio	0,006620101	0,00510833

Tabla 6.6. R_c Teórico y Práctico. (Fuente: Los Autores).

6.6 ANÁLISIS DE RESULTADOS

De los 12 puntos de estudio en el ensayo, puede observarse que las probetas ubicadas cerca de la sección de calentamiento (Zona 1) presentan un tiempo de secado menor a las que se encuentran en la zona más alejada de la sección de calentamiento (Zona 2), esto se debe a que en la Zona 1, la temperatura del aire de secado es mayor que en la Zona 2. Además, la humedad del aire de secado es menor en la Zona 1, que en la Zona 2, dado que el aire de secado aumenta su humedad a medida que arrastra la humedad contenida en el alimento.

De las probetas ubicadas en la Zona 1 (1 a 6) se puede notar que el tiempo de secado es similar (170 min. aprox.), mientras que en las probetas de la Zona 2 (7 a 12), el tiempo de secado es mayor que el de la Zona 1 (205 min. aprox.) observándose que el tiempo de secado de las probetas 8 y 11 es mucho mayor que el del resto de las probetas, lo cual nos indica que el flujo de calor y de aire no es totalmente uniforme en la cámara de secado.

De las Tablas 5.2A y 5.2B, se puede observar que las temperaturas de las probetas que se encuentran en la entrada de la cámara de secado son mayores que las temperaturas de las probetas que se encuentran a la salida del secador. Esto repercute directamente en el tiempo de secado del alimento, se secará primero el alimento que se encuentra en la zona A, aunque esta diferencia no es muy grande.

De la tabla 6.6 se puede observar que el promedio de la Tasa de Secado teórica y práctica no son similares. Esto se debe a que el área de secado no es igual para ambas caras de las bandejas, ya que la malla de fondo ocupa cierto espacio. Además la temperatura de operación registrada en el secador difiere de la teórica.

Como las tasas de secado teórico y práctico no son iguales, evidentemente, los tiempos de secado teórico y práctico tampoco serán iguales. Los mismos difieren en 71 minutos., por lo cual se estima con estos tiempos una eficiencia del secador en 69.78%

COSTOS Y MANTENIMIENTO

7.1 ESTUDIO ECONÓMICO

Cuando se tiene planeado desarrollar un proyecto, se hace necesario realizar un estudio económico con el fin de evaluar los costos que acarrearán la fabricación y operación del equipo. Para tal estudio, se hace necesario seguir una serie de pasos los cuales contemplan la capacidad de producción del equipo, el entorno social donde va dirigido el producto, la localización del mismo y su impacto ambiental en la región.

7.2 PRODUCCIÓN

La producción es conocida como la capacidad del hombre de transformar un elemento, que en el proceso pierde su identidad, para convertirlo en un producto, tomando en cuenta el tiempo, la técnica y la continuidad presentes en su elaboración.

Actualmente la producción de alimento para Pato Real ha sido mermada debido a problemas con el secador que poseen, sin embargo, se están criando estos animales con alimento producido por fábricas especializadas para ello.

7.2.1 PRODUCCIÓN ESTIMADA

En la Tabla 6.1 se muestra la cantidad de alimento requerido por cada animal, mostrando su consumo tanto en los períodos de lluvia como seco, a lo largo de su etapa de crecimiento hasta el momento de su sacrificio (semana 10).



CONSUMO DE ALIMENTO PATO REAL (gramos)

Periodo Seco

	Semana1	Semana2	Semana3	Semana4	Semana5	Semana6	Semana7	Semana8	Semana9	Semana10
	79,03	248,5	388,5	491,6	494,9	591,7	854	900	930	972
	95,9	259	416,5	519,4	529,9	700	848,4	865	943	1002
	67,2	280	333	479,5	479	770	848,4	870	941,6	979,3
	67,2	280	491,6	494,9	579,6	599,9	875	800	950	1030
Prom.	77,33	266,875	407,42	496,35	520,85	665,4	856,45	858,75	941,15	995,82

Periodo LLuvia

	Semana1	Semana2	Semana3	Semana4	Semana5	Semana6	Semana7	Semana8	Semana9	Semana10
	86,1	280	350	625	800,6	875	907	770	901	1092
	149,8	350	533	708	599,9	806	875	890	900	1010
	141,6	316,6	549,5	486,5	546	562,8	528,5	606	870	980
	65,1	280	550	580,2	547	475	774	806	900	1020
Prom.	110,65	306,65	495,62	599,9	623,37	679,7	771,125	768	892,75	1025,5

Tabla 6.1. Consumo de Alimento de Pato Real. (Fuente: FUDECI-AMAZONAS)

Como se observa, la cantidad de alimento consumido por un ejemplar en su semana crítica (semana 10) es de aproximadamente 1000 grs., lo cual si proyectamos para una población de 100 patos, podemos estimar un consumo de 100000 grs. (100 kg). Si a esto consideramos que no todos estos ejemplares consumen la misma cantidad de alimento, podemos decir que se requieren 120 kg. de alimento semanales para abastecer una población de 100 patos reales para la semana 10.

7.2.1.1 PRODUCCION POR MEDIO DEL SECADOR SOLAR

La estación de FUDECI-AMAZONAS cuenta con un secador solar, que posee una capacidad de 50 kg. de alimento por carga, y el tiempo en que éste seca dicha cantidad de alimento es de aproximadamente 2 y ½ días, según información del personal que labora en la estación.

Los ensayos a realizar en el secador solar se vieron limitados debido a que en el momento de la visita a la estación, el secador se encontraba inoperativo.

7.2.1.2 PRODUCCIÓN POR MEDIO DEL SECADOR ELÉCTRICO

El tiempo de secado en este equipo fue de 235 minutos con las condiciones ambientales expuestas (Mes de Abril), lo cual nos arroja una tasa de secado de 30 kg. en 3 horas y 55 minutos.

Si a este tiempo se le suma la carga y descarga del alimento para cada jornada de secado (20 minutos), podemos aproximar una producción de 60 kg. de alimento en 8 horas y 10 minutos (Jornada diaria de trabajo).

Revisando esta proyección, podemos decir que la producción límite del secador es de 300 kg. de alimento procesado semanalmente. Esta cantidad satisface las necesidades alimenticias para una población de 300 ejemplares en la semana de mayor demanda (semana 10).

7.3 COSTOS DEL SECADOR ELÉCTRICO

Los costos del secador se basan principalmente en tres secciones:

7.3.1 COSTO DE FABRICACIÓN

Proviene de cotizaciones a proveedores de materiales así como a talleres de herrería para su manufactura. Para el prototipo, esta cantidad ascendió a 1.574.454,57 Bs. y en el ANEXO 4 se encuentra especificado este costo.

7.3.2 COSTO ENERGÉTICO

Consiste en el gasto producido por concepto de consumo de energía eléctrica (Calculado a una tarifa rural de ELECENTRO a Bs. 50 kW/hora). Tomando 400 horas semanales para producir 60 kg se obtienen 187.400,00 Bs. por concepto de consumo de energía eléctrica.

7.3.3 COSTOS DE OPERACIÓN

Constituye los costos debido a operación y mantenimiento del equipo. En este sentido, se proyecta un operador, el cual también puede realizar labores básicas de mantenimiento como limpieza y pequeños inconvenientes que se puedan presentar en el equipo.

7.4 IMPACTO AMBIENTAL

Con la puesta en funcionamiento del secador eléctrico se mantiene el equilibrio ambiental presente en el Amazonas, este sistema no contamina ni emana gases tóxicos que puedan perjudicar las comunidades rurales a los cuales está dirigida el producto.

7.5 PLAN DE MANTENIMIENTO

El *plan de mantenimiento* eleva el mantenimiento desde un papel meramente secundario a un lugar importante en la gestión de la empresa. La gestión del mantenimiento se convierte en una parte integrante de la empresa y contribuye a sus objetivos.

En la presente situación de mercados, la competencia hace necesaria una reducción en los costos de producción sin que por ello se vea afectada la calidad del producto. La utilización de un plan en la creación de un programa sólido en la gestión del mantenimiento, puede ser un medio efectivo para la reducción de costos. Con la escala de los costos de mano de obra, de los materiales y de los equipos, la reducción de costos de mantenimiento pasa a ser una necesidad para la buena marcha económica de una empresa.

7.5.1 MANTENIMIENTO DEL SECADOR

Los componentes del secador de alimentos se dividieron de acuerdo a las posibilidades técnicas y económicas para repararlo, siendo divididos en desechables y conservables. Los criterios tomados en cuenta para esta clasificación implica el costo de fabricación, rentabilidad de mantenimiento, existencia en el mercado y ejecución del mantenimiento. En la Tabla 6.2 se presenta las partes que componen el equipo de acuerdo a esta clasificación:

NOMBRE DE LA PIEZA	CONSERVABLE	DESECHABLE
Motor eléctrico (ventilador)	√	
Aspas del Ventilador	√	
Resistencia Eléctrica		√
Estructura metálica	√	
Bandejas	√	
Sistema de control		√

Tabla: 6.2 Clasificación de las partes del secador. (Fuente: Los Autores)

El mantenimiento del equipo se comienza a realizar en cada una de sus partes una vez finalizada la cesión diaria de trabajo con la inspección y puesta en marcha del plan; de manera que el equipo esté listo para una nueva jornada. La frecuencia de mantenimiento está directamente ligada con el tipo de equipo utilizado en alguna máquina, esto nos dice que si tenemos equipos rotativos, se le realizará un mantenimiento según un plan, más frecuente que en una maquinaria con gran parte de equipos estáticos.

El plan de mantenimiento especifica para cada uno de los equipos utilizados su mantenimiento respectivo, para esto se establecen frecuencias y tipos de mantenimientos según el fabricante de cada uno de los mismos. En la Tabla 6.3 se presentan cada una de las partes del secador con su respectivo plan de mantenimiento.

EQUIPO	ACTIVIDAD	FRECUENCIA
Motor Eléctrico	1 Comprobar tornillos de sujeción y anclaje 2 Comprobar estado de conexiones, bornes, etc. 3 Comprobar cables de acometida.. 4 Limpiar y comprobar conexiones del colector. 5 Comprobar sujeciones y estado de porta escobillas. 6 Comprobar muelles de presión escobilla. 7 Comprobar estado de escobillas y cambiar defectuosas 8 Comprobar conexiones escobillas. 9 Observar estado de engrase del motor. 10 Verificar chispeo colector. 11 Comprobar si el chispeo es normal. 12 Observar si el consumo es normal y no hay ruidos anormales con el motor en marcha. 13 Verificar la puesta a tierra del motor.	14 horas
Aspas del Ventilador	1 Inspeccionar condiciones generales del rodete deberá estar libre de golpes y grietas. Nota: Cambiar si está defectuoso 2 Limpiar el rodete con paño húmedo.	20 horas
Resistencia Eléctrica	1 Comprobar tornillos de sujeción y anclaje 2 Comprobar estado de conexiones, bornes, etc. 3 Calibrar el termostato.	20 horas
Estructura Metálica	1 Limpieza General. 2 Repaso de pintura en lugares donde presente puntos de oxidación. 3 Inspección de fugas de calor. 4 Verificar, ajustar tornillos y anclajes.	16 horas
Bandejas	1 Limpieza General. 2 Repaso de pintura en lugares donde presente puntos de oxidación. 3 Verificar, ajustar tensión de la malla.	8 horas
Tablero Eléctrico	1 Limpiar elementos del tablero con trapos, aspirador dieléctrico. 2 Ordenar cables por sus respectivos caminos. 3 Comprobar líneas de corriente 4 Comprobar aisladores. 5 Comprobar el estado de interruptores, etc 6 Comprobar si alguno de los elementos (contactores, relés, fusibles, solenoides, etc) está flojo o mal apretado o deteriorado. 7 Comprobar el estado de los contactos principales.. 8 Comprobar si algún fusible está fundido o mal metido en el porta fusible. 9 Comprobar si los fusibles son de los amperios que el esquema indique. 10 Verificar la puesta a tierra.	20 horas

Tabla 6.3 Plan de Mantenimiento del equipo. (Fuente: Los Autores).

Materiales:

- Aceites y grasas.
- Usar aceite Hidralub EP 68 en el cabezal, caja de pasos y guías por medio de lubricación manual.
- Trapo seco.
- Brocha.
- Dieléctrico.
- Lija de Carburo de Tungsteno #400
- Herramientas
- Aceitera y graser.
- Aire comprimido.
- Agua jabonosa
- Tester.
- Herramientas de mecánico y electricista

Mano de obra:

- Electricista.
- Ayudante.

Nota: El secador debe estar desconectado de la red eléctrica.

7.6 INSTRUCCIONES DE OPERACIÓN

Antes de secar

- Distribuir el alimento en capas delgadas (de 0.7 a 1 centímetro aproximadamente) a lo largo de cada una de las bandejas.
- Encender el interruptor #1 correspondiente al ventilador del equipo.
- Encender el interruptor #2 correspondiente a las resistencias 1 y 2 del secador.
- Encender el interruptor #3 correspondiente a la resistencia 3 y termostato.

Después de secar.

- Apagar los interruptores 2 y 3.
- Contar 1 minuto aproximadamente y apagar el interruptor #1.
- Retirar el alimento seco de las bandejas y colocarlo en recipientes adecuados para ello
- Posterior al uso de la secadora, la misma debe desconectarse eléctricamente con el fin de evitar posibles riesgos eléctricos.

7.7 ALMACENAJE Y TRANSPORTE

- El levantamiento o depósito debe ser suave, sin choques.
- Si el secador no fuere inmediatamente instalado, debe ser almacenado en un local seco, exento de polvo, gases, agentes corrosivos, dotado de temperatura uniforme, colocándolo en posición normal y sin apoyar en ello otros objetos.
- Como prevención contra la formación de corrosión por contacto en los rodamientos, el motor del ventilador no deberá permanecer en las proximidades de máquinas que provoquen vibraciones, y los ejes deberán ser girados manualmente por lo menos una vez al mes.

CONCLUSIONES

- El aire usado entrega calor al alimento al mismo tiempo que retira humedad, por lo cual, la velocidad de secado aumenta a medida que sube la temperatura, sin embargo, las altas temperaturas producen daños en el alimento, limitando la temperatura de secado y consecuentemente el rendimiento térmico que el secador puede alcanzar.
- La humedad relativa es un factor determinante en la velocidad de secado, cuando la humedad contenida en el aire aumenta, la velocidad de secado disminuye.
- El secador presentado posibilita la fabricación de alimento para Pato Real, obteniéndose buenos resultados de calidad del producto, según la Norma COVENIN 1881:83 referida a alimento Completo para Aves.
- El sistema cumple con los requerimientos de producción de alimento para Pato Real desarrollado en Puerto Ayacucho, Estado Amazonas.
- La inversión inicial del secador no es alta y los elementos para su construcción existen y no están por inventarse o desarrollarse, sin peligros de suspensión de suministro.
- El mantenimiento del equipo es sencillo, sin necesidad de herramientas complicadas para su elaboración y en algunos casos no se requiere de personal especializado para realizar dicha labor.
- El secador permite ser utilizado durante todo el año, sin afectar la calidad del alimento y manteniendo el equilibrio ambiental presente en el Amazonas.
- El secado ofrece una alternativa al agricultor cuando existen problemas de transporte o se producen bajas de precio por sobreproducción.

RECOMENDACIONES

- Construir las bandejas con marcos redondeados facilitando labores de limpieza, también se debe mejorar el sistema de fijación de la malla de fondo, sugiriendo un sistema con doble marco, fijado con tornillos.
- Recomendamos colocar ruedas en el marco de las bandejas con el fin de facilitar la operación de carga y descarga del alimento al secador.
- Una vez que los productos secos se han retirado de la secadora, tienden a absorber humedad del ambiente, por lo tanto, es recomendable envasarlos en recipientes cerrados una vez finalizado el proceso de secado.
- Como medida de seguridad, los equipos para combatir incendios y avisos de primeros auxilios no deberán faltar en el local de trabajo debiendo estar siempre visible y de fácil acceso.
- Desarrollar proyectos donde se diseñen y construyan equipos en los cuales se procesen frutos y vegetales nacionales, con la finalidad de aumentar las exportaciones de los productos de nuestro país.
- Seguir rigurosamente el plan de mantenimiento propuesto.
- Se recomiendan que sean hechos registros periódicos que serán útiles como referencia para sacar conclusiones del estado de funcionamiento en que se encuentra la máquina.

- Utilizar el secador a su máxima capacidad y en jornadas continuas, para así aprovechar el calor que antecede para la posterior jornada.
- Estudiar la posibilidad de utilizar resistencias con aletas, pudiendo lograr temperaturas más elevadas y reduciendo costos por consumo de energía eléctrica y aumentando la eficiencia del equipo.
- Recomendamos instalar un deshumidificador, aumentando la eficiencia del equipo y reduciendo así la humedad del aire de secado.
- Se recomienda construir el secador con acero inoxidable a fin de utilizar el mismo para productos de consumo humano.

BIBLIOGRAFÍA

- 1.- AMUNDARAIN, José. Tesis 2.002. *Diseño y Simulación de una Máquina Peladora de Piña*. U.C.V. Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica.
- 2.- ARRIA, Francisco; Requena, Freddy. Tesis 1.976. *Diseño de un prototipo de unidad deshidratadora de frutas y vegetales*. U.C.V. Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica.
- 3.- BACHMANN, A., Forberg, R. *Dibujo Técnico*. 2ª Edición Editorial Labor, España, 1.968.
- 4.- BARBOSA, Gustavo V. *Food Engineering Laboratory Manual*. Editorial Technomic. Lancaster PA, U.S.A. 1994.
- 5.- BLANCO, Elias; Sánchez, Pedro Luis. Tesis 2.002. *Diseño y construcción de una máquina para la elaboración de alimentos para animales*. U.C.V. Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica.
- 6.- BRENNAN, J.G.; Butters, J.R.; Cowell, N.D.; Lilly, A.E. *Las operaciones de la ingeniería de los alimentos*. 2ª Edición. Editorial Acribia. Zaragoza, España. 1980.
- 7.- BROKER, Donald B; Barker Arkenna, Fredd W. *Drying and storage of grains and oilseed*. Editorial Van Norstrand Reinhold. New York 1992.
- 8.- COMISION VENEZOLANA DE NORMAS INDUSTRIALES. Norma 1156:79 *Alimentos para animales, determinación de humedad*.
- 9.- COMISION VENEZOLANA DE NORMAS INDUSTRIALES. Norma 1881:83 *Alimento completo para aves*.

- 10.- CORRIPIO, F., *Diccionario Práctico de Sinónimos y Antónimos*. Ediciones Larousse, España, 1.988.
- 11.- INCROPERA, Frank P; De UIT, David P. *Fundamentos de Transferencia de Calor*. 4ª Edición. Editorial Prentice Hall Hispanoamericana. México 1999.
- 12.- MARCILLA, Antonio (1999) *Introducción a las operaciones de separación, TEMA 6, Secado*. [Documento en línea]. Disponible <http://www.ua.es/>. [Consulta: 2003, Abril 18].
- 13.- MILANI, Rodolfo. *Diseño para nuestra realidad*. Editorial Equinoccio. Caracas. (S/F).
- 14.- NIÑO RUIZ, C.A. (S/F) *Diseño y Evaluación de la construcción de un deshidratador de frutas*. [Documento en línea]. Disponible: <http://www.eafit.edu.co/>. [Consulta: 2003, Junio 25].
- 15.- ONOFRE DIAZ, Ligia; Rodríguez Caro, Ingrith. (S/F) *Desarrollo de un proceso de deshidratación de yuca brava MVEN 25 a nivel rural*. [Documento en línea]. Disponible: <http://www.lasalle.edu.co/>. [Consulta: 2003, Junio 25].
- 16.- SHIGLEY, Joseph E. y Charles R. Mischke. *Diseño en Ingeniería Mecánica*. Editorial Mc Graw Hill Interamericana de México, S.A. México 1990.
- 17.- TOLEDO, Romeo T. *Fundamental of Food Process Engineering*. 2ª Edición. Editorial Van Norstrand Reinhold. New York. 1991.
- 18.- <http://www.chromalox.com/>.
- 19.- <http://www.weg.com.br/>.
- 20.- http://www.fao.org/index_es.htm.
- 21.- <http://www.viarural.com.ar/>