

**ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**

## **PERFIL DEL PROYECTO DE GRADO**

***DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA SECADORA DE GRANOS CON CAPACIDAD DE CINCO QUINTALES, POR CALENTAMIENTO DE AIRE MEDIANTE LA COMBUSTIÓN DE LA CASCARILLA DE ARROZ COMO COMBUSTIBLE SÓLIDO DE TIPO VEGETAL, CON APLICACIÓN AL SECTOR AGROINDUSTRIAL MARGINAL DE LA COSTA.***

ELABORADO POR:

Robbie Ernesto Esparza Salinas

Paolo Alejandro Salazar Alvear

Enero 22, 2004  
Sangolquí - Ecuador

# ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO

## CARRERA DE FORMACIÓN DE INGENIEROS MECÁNICOS

### 1. PRESENTACIÓN

Se llama secado al proceso mediante el cual se elimina una cierta cantidad de agua, que contiene el grano y, que se considera perjudicial. Lleva implícito esto, que el grano debe entregarse con una temperatura que no exceda en más de 5 ° C la temperatura ambiente. El proceso de secado de granos se ha transformado en obligatoria como consecuencia de la cosecha anticipada, es decir cosechar cuando todavía el grano no ha adquirido la madurez comercial.

En el proceso de secado de granos el sistema más utilizado en el país es de forma directa, por que el aire que se utiliza para el secado, se mezcla con los gases producto de la combustión, que se originan en la llama. Los combustibles que actualmente se utilizan son: gas, fuel oil, gas oil o mezcla. La principal ventaja de este tipo de secadoras es que todo el calor generado es transmitido a la masa de granos, pero la principal desventaja radica, en que en el caso de existir combustión incompleta, los productos de la misma se mezclan con el aire y pueden transferir olor a la masa de granos.

En la actualidad nos encontramos en un mundo de alta competitividad, en la cual existen factores importantes que se deben tomar en cuenta como la protección al medio ambiente y ahorro de recursos energéticos, es por ello que mediante el presente proyecto de tesis se pretende mejorar eficiencia térmica, calidad del producto, los parámetros económicos y tiempos de secado, mediante la fabricación de una maquina que utilice combustibles alternativos como, la cascarilla de arroz y/o desechos vegetales. Adicionalmente, el sistema propuesto va ha reducir los niveles de contaminación ambiental, que ocasionan los desechos vegetales producidos por las plantaciones agrícolas de nuestro país.

La máquina secadora está integrada por 6 componentes.

- Cámara de lecho fijo.
- Intercambiador de calor
- Tolva de alimentación

- Ciclón
- Sistema de calefacción.
- Cámara de combustión.
- Sistema de extracción

**Cámara de lecho fijo:** Es el lugar donde se coloca el grano a secar y, consta de una serie de componentes que, permiten el intercambio del aire con el grano. En la cámara de lecho fijo el grano está en reposo, por lo que en la parte inferior existe un sistema de recolección del condensado que se produce por el proceso de secado.

**Intercambiador de calor:** Es el sistema que nos permite calentar el aire proveniente del ventilador, y conducirlo hacia la cámara de lecho fijo. Se realizará el estudio, diseño y construcción de un intercambiador de calor aire-aire el mismo que formará una parte fundamental en el sistema propuesto.

**Tolva de alimentación:** Es el lugar donde se coloca la cascarilla de arroz, o los desechos vegetales que van alimentar la cámara de combustión. En la Tolva de alimentación, la cascarilla de arroz está en movimiento descendente, por lo que en la parte inferior existe un mecanismo de descarga, que asegura un descenso uniforme y permite regular la cantidad de la cascarilla de arroz que sale por hora, es decir el rendimiento / hora de la secadora.

**Ciclón:** Conducen el aire y pequeñas impurezas de la cámara de combustión, con el fin de mejorar la calidad de la llama en la cámara de combustión.

**Sistema de calefacción:** Son, el primero debe impulsar el aire caliente por entre la masa de granos, el segundo extraer el aire caliente, a través del conducto de ciclón, con pequeñas impurezas provenientes de al combustión de la cascarilla de arroz.

Debiendo considerarse dos aspectos en la elección de los ventiladores.

- Que el caudal de aire que dos, debe estar en relación con el grano que se seca por hora.

- La presión del aire debe en relación con el espesor de la masa de granos que se quiere secar.

**Cámara de combustión:** Un quemador calienta el aire proveniente del ambiente, para disminuir su humedad relativa por medio de un intercambiador de calor, de forma indirecta ya que los gases circulan por tubos previamente calentados, bajando así la posibilidad de contaminación por los gases de combustión y perdiendo poder calórico, en el calentamiento de los tubos de conducción del aire.

Es importante destacar, que en el presente proyecto de tesis todos los componentes serán diseños nuevos, únicos, innovados y apropiados para lograr los objetivos deseados y no, una simple selección o adaptación de equipos fabricados en el extranjero.

## **2. TITULO**

*Diseño y construcción de una secadora de granos con capacidad de cinco quintales, por calentamiento de aire mediante la combustión de la cascarilla de arroz como combustible sólido de tipo vegetal, con aplicación al sector agroindustrial marginal de la costa.*

## **3. RESPONSABLES**

Robbie Ernesto Esparza	Egresado de la FIME
Paolo Alejandro Salazar Alvear	Egresado de la FIME

## **4. ELABORACIÓN DEL ANTEPROYECTO**

Robbie Ernesto Esparza  
Paolo Alejandro Salazar Alvear

## **5. COLABORADORES PROFESIONALES**

Ing. José Guasumba.	(Sugerido)
Ing. Ernesto Soria.	(Sugerido)
Ing. Roberto Gutiérrez	(sugerido)

## **6. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA**

Provincia de Pichincha, Cantón Rumiñahui, Sangolquí, ESPE.

## **7. ÁREA DE INFLUENCIA**

El presente proyecto de Tesis, *“Diseño y construcción de una secadora de granos con capacidad de cinco quintales, por calentamiento de aire mediante la combustión de la cascarilla de arroz como combustible sólido de tipo vegetal, con aplicación al sector agroindustrial marginal de la costa”*, pretende dar una solución energética y ambiental al utilizar como combustible alternativo la cascarilla de arroz y/o desechos vegetales, en el proceso de deshidratación del grano, y la eliminación de combustibles tradicionales como: gas, fuel oil, gas oil o mezcla. Beneficiando directamente al sector agro-industrial marginal de la costa, al disminuir los costos en el proceso de secado de granos.

Indirectamente se beneficiará todo el entorno natural al disminuir los altos niveles de contaminación producidos por desechos vegetales, y la combustión de gas, fuel oil, gas oil o mezcla, dentro de un marco de equilibrio ecológico, cumpliendo de esta manera con las normativas legales de protección del ambiente existente en nuestro país.

También se previene la amenaza de que en un futuro próximo, tengamos que depender de los combustibles fósiles para el desarrollo agro-industrial de nuestro país.

## **8. ANTECEDENTES**

En la actualidad existen varios tipos de secadores de granos que utilizan combustibles como: gas, fuel oil, gas oil o mezcla, para el calentamiento del aire utilizado en el proceso de secado de granos, incrementando el costo del proceso.

Las Instalaciones de secado que existen actualmente en la Costa, tienen un bajo rendimiento térmico, tiempos de secado prolongados, originan pérdidas del producto y del combustible sólido vegetal, contaminan el ambiente por la presencia de cascarilla no quemada y partículas de ceniza en suspensión, debido a la ineficiente combustión.

Luego de haber realizado la etapa de investigación preliminar para el mejoramiento de la combustión y la transferencia al fluido de trabajo, utilizando

pequeños modelos experimentales, se propone diseñar y construir el modelo de utilidad de aplicación industrial, el mismo que comprende lo siguiente: Cámara de secado, Intercambiador de calor, Cámara de combustión, Sistema de alimentación de aire, Sistema de calefacción, Sistema de alimentación del combustible, Sistema de encendido, Sistema de control electrónico.

En las secadoras estáticas el aire atraviesa el cereal en un solo sentido, por lo que el grano cercano a la pared, por donde entra el aire, resultará más caliente y seco que el que se encuentra más alejado.

En las secadoras de flujo continuo de columna, ocurre lo mismo porque el grano recorre líneas verticales durante su descenso. Como resultado el producto obtenido no será homogéneo es decir tendremos dentro de la masa de granos, temperaturas y humedades distintas, lo que podrá ocasionar problemas durante el almacenamiento y su venta.

En cambio en las secadoras de caballete y en las de flujo continuo de aire opuesto, se logra un secado más parejo, homogéneo y de mejor calidad. En cualquiera de todos los sistemas después del aire caliente el producto recibe aire natural.

Esto es debido a que al atravesar el aire frío el grano caliente, es el aire el que se calienta bajando su humedad relativa y continuando entonces el secado.

Es importante efectuar trabajos de pre-limpieza, de la masa de granos, antes de ingresarla a la secadora. El aire caliente producido en la secadora, extraerá humedad de todo lo que acompañe al grano, es decir cuerpos extraños, polvillo, tierra, etc. que normalmente tienen un mayor porcentaje de humedad.

Además estos cuerpos extraños pequeños dificultan el pasaje de la masa de aire, impidiendo la óptima circulación.

El sistema actual presenta notables desventajas y problemas los cuales son:

- Altos costos en el proceso de secado de grano debido a la utilización de combustibles tradicionales como: gas, fuel oil, gas oil o mezcla.
- La falta de un sistema que les ayude a mejorar la calidad de llama en la cámara de combustión, para mantener la temperatura ideal en el secado de granos.
- Falta de homogeneización del escurrimiento de los granos dentro de la secadora, y el otro la homogeneización de las temperaturas en el plano horizontal.
- Ineficiencia por las pérdidas que se dan en la conducción del aire caliente por medio de los conductos hacia el grano. Dando como resultado una mala calidad en las harinas, o alargando el tiempo del secado.
- Los gases emitidos de la combustión de gas, fuel oil, gas oil o mezcla también perjudican al medio ambiente contaminándolo.
- Los elevados costos en la adquisición de máquinas secadoras de grano, debido a la importación de las mismas.

Con la realización del presente proyecto de tesis, se pretende resolver los problemas mencionados, diseñando un sistema nuevo, que aproveche la energía térmica disponible de la combustión de la cascarilla de arroz y desechos vegetales, reduciendo el consumo de gas, fuel oil, gas oil o mezcla, para el secado de grano.

Es importante recalcar también que la intención de este proyecto de tesis así como del Centro de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Fuerza Terrestre CICTE es, diseñar y construir una máquina que utilice energías alternativas (como la cascarilla de arroz), para el desarrollo agroindustrial del país, así como la reducción de los tiempos de secado de granos de una manera adecuada, y que se pueda construir con tecnología nacional, y no sea una simple selección de equipos para adquirir en el mercado internacional, obteniéndose de esta manera un verdadero beneficio económico, demostrando así que en el país existen profesionales suficientemente capacitados para diseñar y construir equipos de nueva tecnología.

## **9. PROYECTOS RELACIONADOS Y/O COMPLEMENTARIOS**

Este proyecto está directamente relacionado con el proyecto que respalda el CICTE, que se titula OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE COMBUSTIÓN DE LA

## CASCARILLA DE ARROZ COMO UNA ALTERNATIVA ENERGÉTICA PARA EL SECADO DE GRANOS EN CÁMARA DE LECHO FIJO..

Este proyecto es una contribución al desarrollo nacional de la ESPE-CICTE , enfocado directamente al área de energía y mecánica aplicada.

Esta investigación se inició en el año 2001, con el propósito de mejorar el proceso de combustión de la cascarilla de arroz, que en la actualidad se considera como un desecho vegetal. Así como también a mediano plazo se propone colaborar con la modernización de las instalaciones pertenecientes a los pequeños productores agrícolas de los sectores de Quevedo y Ventanas.

Se han desarrollado pruebas experimentales de combustión de la cascarilla utilizado pequeños modelos de cámaras hasta lograr alcanzar la temperatura de proceso de aire caliente de 100 °C a la salida del ducto de alimentación del producto

### **10. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA**

La tecnificación de los procesos productivos tradicionales, principalmente en el sector agroindustrial marginal de la costa ecuatoriana, es de vital importancia para la generación de valor agregado en nuestras materias primas, mediante el aporte de conocimientos y tecnología propia. Bajo esta consideración la ESPE como una Institución líder en el ámbito de la investigación científica, y tecnológica en el país, patrocina el desarrollo de proyectos que vayan en beneficio directo de la comunidad, por esta razón, se inicia una investigación preliminar sobre el uso de la cascarilla de arroz como combustible sólido alternativo para el secado de granos en cámaras de lecho fijo.

Dada la complejidad de este proyecto de I +D, y al no contar con ningún modelo industrial de referencia, se tiene previsto innovar el sistema de secado de granos, trabajando en forma conjunta personal de la empresa privada, profesores FIME, egresados de la Facultad de Mecánica, que aportarán con conocimientos en la parte del diseño de los componentes.

Para la Fase de construcción van a participar empresas especializadas en el sector metal mecánico localizadas en la Ciudad de Quito.



Por otra parte, este proyecto surge de la necesidad que tiene los pequeños productores agrícolas de Quevedo y Ventanas, que nos permitieron visitar las instalaciones donde se pudo determinar las serias ineficiencias, constructivas y operativas de estas tecnologías que fueron instaladas por la industria colombiana. Por lo tanto, es necesario introducir varias innovaciones en el modelo de combustión, cámara de combustión, sistema de calefacción, para llegar a tener un sistema térmico óptimo, y así generar regímenes de secado, características constructivas, y especificaciones para la fabricación en serie de nuevos equipos, que basados en el modelo de utilidad propuesto, contribuyan al desarrollo sostenido y sustentable de amplios sectores agrícolas y marginales de nuestro país, así como también a la generación de empleo y el ahorro de divisas por la compra de equipos importados.

Es necesario dar a conocer que los diseños introducidos en el modelo experimental y el propuesto, en el modelo de utilidad son totalmente diferentes en sus características técnicas, configuraciones geométricas, materiales, pero si se parte de los parámetros de la combustión y de la transferencia térmica del fluido de proceso obtenida a lo largo de dos años de investigación, utilizando micro prototipos.

Además, El desarrollo del presente proyecto es importante desde diferentes puntos de vista entre los que podemos enumerar los siguientes:

Económico.- Se reducirán los parámetros económicos en el sistema de combustión del proceso de secado de granos, al cambiar los combustibles como el gas, fuel oil, gas oil o mezcla, por otro alternativo como la cascarilla de arroz y/o desechos vegetales.

Ahorro en el pago de impuestos por ser productores de la maquina y no importadores.

Tecnológico.- El desarrollo de máquinas, es una manera de impulsar el desarrollo del país, el beneficio viene no sólo para las empresas necesitadas del servicio de estas nuevas máquinas, sino también para las empresas que las construyen.

**FALTA INCORPORAR EL VALOR AGREGADO DEL PROYECTO**

Energético.- El sistema propuesto aprovecha de forma más eficiente la energía térmica de la cascarilla de arroz y/o desechos vegetales en la cámara de combustión, debido al sistema avivador de llama (Extractor de ciclón), ayudando a mantener una temperatura adecuada, para mejorar el proceso de secado de granos.

Ambiental.- Disminuir los niveles de contaminación generados por los desechos vegetales provenientes de las cosechas agrícolas y peladoras de arroz. Además la reducción del uso de combustibles convencionales fósiles, utilizados para la deshidratación del grano en la combustión, ya que producen gases con altos contenidos de carbono.

## **11. MARCO INSTITUCIONAL.**

Entidad nacional ejecutora responsable del proyecto es el Centro de Investigación Científica y Tecnológica de la Fuerza Terrestre “CICTE”,  
Entidad responsable, auspiciante y adjudicataria: Centro de Investigación Científica y Tecnológica de la Fuerza Terrestre “CICTE”,

## **12. META DEL PROYECTO.**

Diseñar y construir una máquina que permita utilizar como combustible alternativo la cascarilla de arroz, en la cámara de combustión para el proceso del secado de granos, con esto se pretende disminuir parámetros básicos como el energético y económico:

En lo que se refiere a los parámetros energéticos se puede citar algunos de los más importantes para el desarrollo de este proyecto como son:

- Lograr un ahorro de consumo de energía
- Mejoramiento de la eficiencia de este tipo de equipos
- Disminución del tiempo de secado
- Con el sistema extractor tipo ciclón propuesto se obtendrá un mejor control en la combustión de la cascarilla de arroz, aprovechándolo de manera más eficiente sus propiedades caloríficas

En los parámetros económicos se puede citar aspectos como son:

- Menores costos de transporte por que el producto se lo transporta seco
- Cosecha de los productos sin la utilización de plaguicidas e insecticidas por la no presencia de insectos y hongos
- El ahorro en la compra de combustibles convencionales fósiles, que se utilizan actualmente.
- Anticipación de la cosecha, lo que deja libre el suelo para nuevas siembras

### **13. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

El proyecto de tesis tiene los siguientes objetivos:

- Realizar el diseño de cada uno de los sistemas de funcionamiento de la máquina.
- Utilizar combustibles alternativos en la cámara de combustión como: Cascarilla de arroz que es de tipo vegetal
- Determinar la eficacia y eficiencia, producida en la cámara de combustión, mediante un sistema de extracción tipo ciclón.
- Determinar el ahorro en consumo de energía y costos de operación de la máquina a fabricar respecto a las máquinas existentes actualmente, y que utilizan en el sector agro-industrial de la costa ecuatoriana.

### **14. METODOLOGÍA Y EQUIPAMIENTO QUE SE PROPONE EMPLEAR**

Para la ejecución del proyecto se definirán a continuación por cada objetivo (fases del proyecto) las actividades, metodología (procesos y tecnología) y recurso a emplearse.

De acuerdo a las tres fases principales mencionadas:

- Diseño
- Construcción y Montaje.
- Pruebas

### **15. PLAZO DEL PROYECTO**

Para la ejecución del proyecto se definirán a continuación los tiempos requeridos para el cumplimiento de cada una de las fases a partir de la aprobación del mismo.

Definimos para el proyecto tres fases principales la cuales son:

- Diseño: 2 meses.
- Construcción: 3 meses.
- Pruebas: 1 mes

Por lo descrito anteriormente el proyecto se estima terminar en el lapso de 6 (seis) meses.

## **16. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES PARA LA EJECUCIÓN**

El cronograma de actividades será detallado de acuerdo a las fases en que se ha dividido el proyecto. Ver Anexo 3.

## **17. BIBLIOGRAFÍA**

- 1.– Doyle E. Lawrence. 1988 Materiales y procesos de manufactura para ingenieros. Prentice- Hall Inc.
- 2.– Larburu N. 1999 Máquinas Prontuario Técnicas máquinas herramientas. Editorial Paraninfo.
- 3.– Shigley E. 1990 Diseño en ingeniería mecánica. McGraw-Hill. Quinta Edición.
- 4.– Artobolewski I. I. 1976 Mecanismos en la Técnica Moderna Editorial MIR-MOSCÚ.
- 5.– Spotts M. F. 1975 Proyecto de Elementos de Máquinas Editorial Reverte
- 6.– <http://www.uca.edu.sv/facultad/ing/mecarch/m210035/GUIA.htm>.
- 7.- <http://www.fra.utn.edu.ar/institucional/departamentos/elementosdemaq.asp>.

## **18. PRESUPUESTO DESGLOSADO**

El desglose del proyecto se detalla en el anexo 1.

## **19. FINANCIAMIENTO**

El financiamiento del proyecto se detalla en el anexo 2.

## **20. CRONOGRAMA DE DESEMBOLSOS**

El cronograma de desembolsos del proyecto se detalla en el anexo 4.

# ANEXO 1

## PRESUPUESTO DEL PROYECTO

### 1 INGENIERIA Y ADMINISTRACION

1,1	<b>Personal</b>			<b>USD</b>	<b>USD</b>
	<b>Cant</b>	<b>Posición</b>	<b>Horas-H</b>	<b>Valor H-H</b>	<b>Valor total</b>
				<b>TOTAL 1,1</b>	<b>0</b>

1,2	<b>Miscelaneos</b>	<b>USD</b>
	Materiales	100
	Utiles de oficina	50
	Combustibles y lubricantes	10
	Uso de Vehículos	50
	Repuestos y suministros	0
	Alquileres de oficina y talleres	0
	Servicios básicos (electricos, agua potable, teléfono, otros)	50
	Viáticos y subsistencias	40
	Otros gastos de funcionamiento	70
	<b>Total</b>	<b>370</b>
	<b>SUB TOTAL 1</b>	<b>370</b>

### 2 COSTOS DIRECTOS

2,1	<b>honorarios profesionales</b>	<b>USD</b>	<b>USD</b>	<b>USD</b>	
	<b>Cantidad</b>	<b>Posición</b>	<b>Horas-H</b>	<b>Valor H-H</b>	<b>Valor total</b>
	1	Ingeniero Electronico	160	8	1280
	1	Investigaor Constructor	200	12	2400
				<b>TOTAL 2,1</b>	<b>3680</b>

#### REMUNERACIONES A NO PROFESIONALES USD USD

2,2	<b>Cant</b>	<b>Posición</b>	<b>Horas-H</b>	<b>Valor H-H</b>	<b>Valor total</b>
	1	Soldador	40	6	240
	1	Mecanico en montaje	250	6	1500
	1	Tecnico mecanico	202	8	1616
	1	Ayudante	250	5	1250
				<b>TOTAL 2,2</b>	<b>4606</b>

#### REMUNERACIONES A ESTUDIANTES USD USD

2,3	<b>Cant</b>	<b>Posición</b>	<b>Horas-H</b>	<b>Valor H-H</b>	<b>Valor total</b>
	2	Diseñadores			0
				<b>TOTAL 2,3</b>	<b>0</b>

## FINANCIAMIENTO DEL PROYECTO

RUBROS	PRESUP.	RECURSOS PROPIOS	%	RECURSOS EXTERNOS	%
1. INGENIERIA Y ADM.	370	370			
2. COSTOS DIRECTOS	23593,5			23593,5	
3. IMPREVISTOS	1179,67			1179,67	
4. ESCALAMIENTOS DE COSTOS	0				
5. COSTOS FINANCIEROS	50	50			
<b>TOTAL GENERAL</b>	<b>25193,17</b>	<b>420</b>	<b>1,667</b>	<b>24773,17</b>	<b>98,33</b>

## ENTIDAD NACIONAL DE FINANCIAMIENTO

ENTIDAD	MONTO
CICTE	24773,17

## ANEXO 2

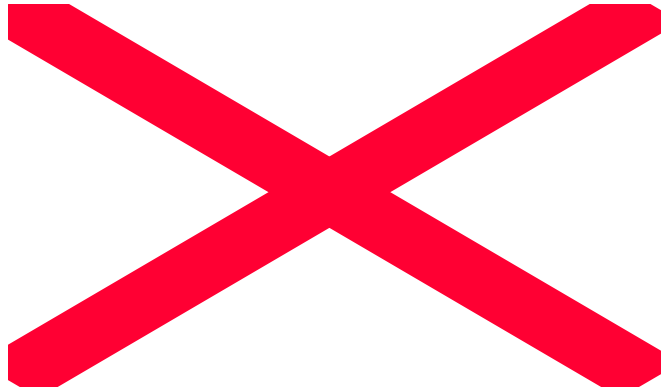
### FINANCIAMIENTO DEL PROYECTO

RUBROS	PRESUP.	RECURSOS PROPIOS	%	RECURSOS EXTERNOS	%
1. INGENIERIA Y ADM.	370	370			
2. COSTOS DIRECTOS	23593,5			23593,5	
3. IMPREVISTOS	1179,67			1179,67	
4. ESCALAMIENTOS DE COSTOS	0				
5. COSTOS FINANCIEROS	50	50			
<b>TOTAL GENERAL</b>	<b>25193,17</b>	<b>420</b>	<b>1,667</b>	<b>24773,17</b>	<b>98,33</b>

### ENTIDAD NACIONAL DE FINANCIAMIENTO

ENTIDAD	MONTO
CICTE	24773,17

## ANEXO 3





## ANEXO 4

<b>RUBROS</b>	<b>PRESUP.</b>	<b>I MES</b>	<b>II MES</b>	<b>III MES</b>	<b>IV MES</b>	<b>V MES</b>	<b>VI MES</b>
1.INGENIERIA Y ADM.	370	70	50	50	50	50	100
2.COSTOS DIRECTOS	24773,17	4336,7	4821,2	5171,2	4799,2	4465,2	
3.IMPREVISTOS						1179,67	
4.ESCALAMIENTOS DE COSTOS							
5.COSTOS FINANCIEROS	50	25				25	
<b>TOTAL</b>	<b>25193,17</b>	<b>4431,7</b>	<b>4871,2</b>	<b>5221,2</b>	<b>4849,2</b>	<b>5719,87</b>	<b>100</b>
TOTAL ACUMULADO	25193,17	4431,7	9302,9	14524,1	19373,3	25093,17	25193,17
<b>PORCENTAJE ACUMULADO</b>	<b>100</b>	<b>17,59</b>	<b>36,93</b>	<b>57,65</b>	<b>76,90</b>	<b>99,60</b>	<b>100,00</b>

## **21. PLAN ANALÍTICO**

### **Resumen**

### **Introducción**

#### **Cap 1. Descripción General del Proyecto**

- 1.1. Antecedentes.
- 1.2. Definición del problema.
- 1.3. Señalamiento de Objetivos
  - 1.3.1 Objetivo General.
  - 1.3.2 Objetivos Específicos.
- 1.4. Alcance del Proyecto
- 1.5. Justificación

#### **Cap 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS**

- 2.1. Concepto de secado
- 2.2. Cámara de combustión
  - 2.2.1 Concepto de combustión
  - 2.2.2 Ladrillo refractario
- 2.3. Biocombustibles
  - 2.3.1. Concepto de Biocombustibles.
    - 2.3.1.1 Biocombustibles líquidos.
      - 2.3.1.1.1 Biofuel
    - 2.3.1.2 Biocombustibles sólidos.
      - 2.3.1.2.1 Cascarilla de arroz.
      - 2.3.1.2.2 Desechos Vegetales.
  - 2.3.2 Ventajas
  - 2.3.3 Desventajas.
- 2.4. Concepto desechos vegetales.
- 2.5. Concepto de Ciclón.
- 2.6. Concepto de humidificación.

#### **Cap 3. SECADORAS CONVENCIONALES DE GRANOS**

- 3.1. Descripción del proceso de secado de granos.
- 3.2. Tipo de secadores.
  - 3.2.1 Secadores Continuos.
    - 3.2.1.1. Secador de columna.
    - 3.2.1.2. Secador de caballete.
    - 3.2.1.3. Secador de pantalla o flujo en sentido opuesto.
  - 3.2.2 Secadores Discontinuos.
    - 3.2.2.1. Estático.
    - 3.2.2.2. Recirculado.
  - 3.2.3 Secadores Estacionarios
    - 3.2.3.1. Secador de Lecho Fijo.
    - 3.2.3.2. Secador con aire movido por convección natural.

- 3.3 Parámetros del secado de granos.
  - 3.3.1. Condiciones del aire ambiente.
  - 3.3.2. Temperatura de secado.
  - 3.3.3. Presión estática y flujo de aire.
  - 3.3.4. Humedad inicial del producto.
  - 3.3.5. Velocidad del secado.
- 3.4 Problema del secado de granos en el Ecuador
- 3.5 Posibles soluciones

#### **Cap 4. COMPONENTES DE LOS SISTEMAS**

- 4.1 Sistema térmico.
  - 4.1.1. Cámara de combustión.
  - 4.1.2. Sistema de calefacción.
  - 4.1.3 Intercambiador de Calor
  - 4.1.4. Sistema de extracción.
- 4.2. Sistema mecánico
  - 4.2.1. Tolva de alimentación.
  - 4.2.2 Cámara de Secado.
    - 4.2.2.1 Chapa perforada

#### **Cap 5. DISEÑO DE COMPONENTES**

- 5.1 Cámara de combustión
  - 5.1.1 Cálculo y diseño de la cámara de combustión
  - 5.1.2 Modelo matemático del equipo
    - 5.1.2.1 Balance térmico del sistema
    - 5.1.2.2 Cálculo de pérdidas por convección
    - 5.1.2.3 Cálculo de pérdidas por radiación
  - 5.1.3 Dimensionamiento del Equipo
  - 5.1.4 Planos constructivos del equipo
  - 5.1.5 Estudio y selección de materiales adecuados para su construcción
  - 5.1.6 Especificaciones y Tolerancias
- 5.2 Intercambiador de Calor
  - 5.2.1 Tipos de intercambiadores
  - 5.2.2 Selección de intercambiadores de calor
  - 5.2.3 Cálculo y diseño del intercambiador de calor
    - 5.2.3.1 Cálculo de coef. de transferencia de calor
    - 5.2.3.2 Cálculo del coef. de película de la coraza
  - 5.2.4 Determinación del área de flujo y diámetros equivalentes.
    - 5.2.4.1 Cálculo de la caída de presión en ánuos
    - 5.2.4.2 Corrección por viscosidad del fluido
    - 5.2.4.3 Determinación del diámetro equivalente de la coraza
    - 5.2.4.4 Determinación del número de tubos y SCH de los mismos.

- 5.3 Sistema de alimentación de cascarilla
  - 5.3.1 Cálculo y diseño del sistema de alimentación de la cascarilla
  - 5.3.2 Modelo matemático del equipo
  - 5.3.3 Dimensionamiento del Equipo
  - 5.3.4 Planos constructivos del equipo
  - 5.3.5 Estudio y selección de materiales adecuados para su construcción
  - 5.3.6 Especificaciones y Tolerancias
  
- 5.4 Sistema de extracción tipo ciclón
  - 5.4.1 Cálculo y diseño del sistema de extracción tipo ciclón
  - 5.4.2 Modelo matemático del equipo
  - 5.4.3 Dimensionamiento del Equipo
  - 5.4.4 Planos constructivos del equipo
  - 5.4.5 Estudio y selección de materiales adecuados para su construcción
  - 5.4.6 Especificaciones y Tolerancias
  
- 5.5 Cámara de secado
  - 5.5.1 Cálculo y diseño de la cámara de secado
  - 5.5.2 Modelo matemático del equipo
  - 5.5.3 Dimensionamiento del Equipo
  - 5.5.4 Planos constructivos del equipo
  - 5.5.5 Estudio y selección de materiales adecuados para su construcción
  - 5.5.6 Especificaciones y Tolerancias

## **Cap 6. CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO**

- 6.1 Proceso de construcción (Prototipo)
- 6.2 Organigrama de trabajo.
- 6.3 Tiempos de ejecución.
- 6.4 Maquinas y equipos a utilizar

## **Cap 7. ANÁLISIS ECONÓMICO**

- 7.1 Costos del proyecto
  - 7.1.1 Análisis costos materiales
- 7.1.2 Costos de operación
- 7.1.3 Maquinarias y Equipos

## **Cap 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **BIBLIOGRAFÍA**

### **ANEXOS**

### **REFERENCIAS DE NORMAS**

### **PLANOS**



## **22.- FIRMAS.**

El anteproyecto de tesis con título “diseño y construcción de una secadora de granos con capacidad de cinco quintales, por calentamiento de aire mediante la combustión de la cascarilla de arroz como combustible sólido de tipo vegetal, con aplicación al sector agroindustrial marginal de la costa”, ha sido:

Desarrollado por:

---

**Sr. Robbie Ernesto Esparza Salinas**

---

**Sr. Paolo Alejandro Salazar Alvear**

Revisado por:

---

**Ing. José Guasumba**

**Revisor 1**

---

**Ing. Roberto Gutiérrez**

**Revisor 2**

# CAPÍTULO 1

## GENERALIDADES

### 1.1 ANTECEDENTES

En las provincias de Bolívar, de Los Ríos y Manabí se pudo constatar el evidente desarrollo de la pequeña industria del país<sup>1</sup>, en lo que se refiere al proceso productivo de granos como arroz, maíz, fréjol, maíz pelado (mote), morochillo.

Al existir gran cantidad de producción como cereales y granos, también existen muchas empresas que se encargan de la comercialización de estos productos, los cuales necesitan almacenar los mismos, pero muchas veces los granos no se encuentran con las condiciones necesarias para su bodegaje y venta posterior.

Estas pequeñas industrias muchas veces deben contratar servicios para el secado, y así reducir el porcentaje de la humedad de los granos para su posterior comercialización, a demás de este servicio hay que sumar el costo de transportación y el tiempo que se pierde en este proceso, ya que el producto no se puede comercializar oportunamente y a tiempo lo cual perjudica al productor.

Dentro de este ámbito la empresa Villares Wilo, piladora de arroz, una de las más reconocidas en la zonas de Ventanas en la Provincia de Los Ríos, cuenta con un horno para secado de granos, esta infraestructura tiene alrededor de 12 años, pero la misma no garantiza la humedad final (14%), en el tiempo requerido, para su almacenamiento, ocasionándole problemas de calidad de sus productos. El tiempo de secado en este horno es alrededor de 12 horas<sup>2</sup>.

---

<sup>1</sup> Gira realizada a estas provincias , septiembre 2003

<sup>2</sup> VILLARES W., Piladora, Ventanas Provincia de Los Ríos, 2003

## **1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.**

En la actualidad existen pequeños productores agrícolas de la sierra y costa ecuatoriana como las provincias de Bolívar, Los Ríos y Guayas, los que utilizan secadoras de granos con combustión de gas.

Estos sistemas tienen desventajas muy claras, en el caso del secador a gas, al ser una energía no renovable sabemos que ésta tiene limitada su existencia, por lo que es necesario investigar nuevas alternativas que ayuden a sustituir esta materia de combustión para utilizarla en secadoras para granos. Otra opción es la utilización de desechos vegetales como es el caso de cascarilla de arroz, tusa de maíz, tagua (desecho de la confección de botones).

En algunos casos existen productores que emplean secadoras de granos con combustión de cascarilla de arroz, los mismo que tienen poca eficiencia en vista de su diseño rustico, lo cual se evidencia por su estructura física, ya que no tiene un sistema de alimentación de cascarilla, protección y seguridad del secador (sistema de control), acceso de limpieza del banco de tubos del intercambiador, aislamiento de paredes para aprovechamiento de calor, y tiempo de secado prolongado más de 12 horas).

## **1.3 OBJETIVOS**

### **1.3.1 General**

Mejorar el sistema de combustión de la cascarilla de arroz en el hogar de la cámara de combustión aprovechando la transferencia de calor de los gases de combustión para calentar el aire que ingresará al intercambiador de calor y que nos ayudará a secar el maíz para su posterior comercialización.

### **1.3.2 Específicos.**

- Construir una secadora de granos, basado en el calentamiento de aire producto de la combustión de la cascarilla de arroz
- Reducir el tiempo de secado de granos que es de 12 horas
- Llegar a la humedad final del producto a secar del 14%.

## **1.4 ALCANCE DEL PROYECTO.**



Mediante la implementación de este proyecto se pretende mejorar el proceso de secado de granos a través de la utilización de la combustión de la cascarilla de arroz como combustible ecológico. Se utilizará una disposición horizontal de tubos para el intercambiador de calor.

Para alcanzar este propósito, se hará uso de una tecnología confiable, aplicable y garantizada, que permita llegar a la humedad final del producto con el más bajo consumo de energía posible y que además esté orientado a satisfacer las más exigentes normas de calidad industrial y ambiental.

Consecuentemente el proyecto incluirá varios trabajos tales como la determinación de las propiedades físicas y químicas del producto a secar, determinación de las propiedades psicrométricas del aire de secado, cálculo de los parámetros de diseño y dimensionamiento del secador acorde a la realidad y necesidades de las empresas existentes en el medio, planos del secador, al igual que un manual de operación de la unidad.

## **1.5 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA**

En nuestro país se producen aproximadamente 1´100.000 toneladas métricas de arroz al año<sup>3</sup>, de las cuales se obtiene alrededor de 220.000 toneladas métricas de cascarilla de arroz, esta cifra nos indica la existencia de una gran fuente de energía que puede ser aprovechada como combustible y que actualmente está considerada como desecho o basura en muchas poblaciones agroindustriales.

El aprovechamiento de esta energía se la puede lograr mejorando los sistemas utilizados actualmente, disminuyendo inclusive el costo de secado de cada saco de granos al productor ya que utilizaría los desechos (cascarilla de arroz) para secar sus productos.

Esto se desarrollará realizando investigaciones de campo, pruebas y toma de datos con los sistemas utilizados en la actualidad y aportando con conocimientos de ingeniería adquiridos a lo largo del desarrollo profesional.

El proyecto es auspiciado por el CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA DEL EJÉRCITO, entidad que promueve la investigación de nuevas tecnologías en provecho del país.

---

<sup>3</sup> SICAGRO, Cuadro estadísticas de arroz , internet, año 2006

El proyecto está dirigido a beneficiar a los pequeños productores del agro ecuatoriano y en beneficio del avance tecnológico del país.

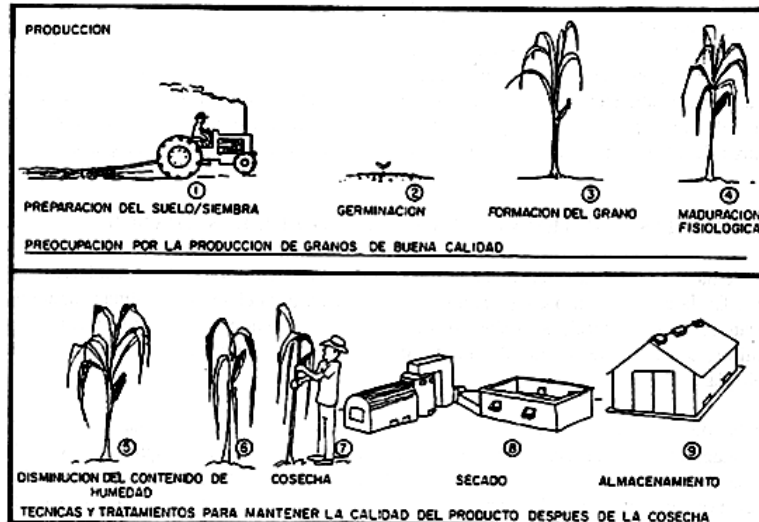
## **CAPITULO 2**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1 Proceso de secado de granos**

El secado es un proceso de gran importancia en la cadena de producción de alimentos, ya que el contenido de humedad es, sin duda, la característica más importante para determinar si el grano corre el riesgo de deteriorarse durante el almacenamiento. El secado se realiza para inhibir la germinación de las semillas, reducir el contenido de humedad de los granos hasta un nivel que impida el crecimiento de los hongos, y evitar las reacciones de deterioración (figura 2.1).

Una definición clara y completa de lo que es el secado puede ser la siguiente: "es el método universal de acondicionar los granos por medio de la eliminación del agua hasta un nivel que permita su equilibrio con el aire ambiente, de tal forma que preserve su aspecto, sus características de alimentos, su calidad nutritiva y la viabilidad de la semilla".



**Figura 2.1** Etapas entre la producción de granos y el almacenamiento.

Con los métodos tradicionales de secado de granos, en lo que se refiere a los pequeños agricultores, se producen pérdidas en la calidad del producto antes y durante el almacenamiento. Una de las principales fuentes de pérdidas es la falta de un secado adecuado, ya que la mayoría de los agricultores utilizan el secado natural, en donde el producto es expuesto a la intemperie y sujetos al ataque de insectos. A pesar de esto, los pequeños agricultores continúan empleando este método por su bajo costo y también debido al desconocimiento de otras técnicas.

Durante el secado de los granos, se presentan dos fenómenos:

- La transferencia de calor para evaporar los fluidos. Que es el calor cedido por el aire al grano, creando un desequilibrio entre las humedades del grano y la ambiente.
- La transferencia de masa, en forma de humedad interna y vapor, del grano al aire.

La transferencia de la humedad se realiza mientras exista un desequilibrio entre la humedad del grano y la humedad relativa del aire de secado. Para que exista secado, se necesita que la humedad relativa del aire esté por debajo de la humedad de equilibrio del grano que se está secando.

## 2.2 Fundamento del secado

No existe una única teoría de secado que cubra todos los granos ni todos los tipos de secadores. Las variedades de las fases, de la forma y tamaño de grano, de la humedad de equilibrio, del mecanismo de flujo de humedad a través del sólido y del método utilizado para suministrar el calor de vaporización necesario, impiden dar al problema un tratamiento unificado.

La difusión está controlada por las diferencias de concentración expresadas en fracciones molares. Sin embargo para un sólido húmedo el término, fracción molar, tiene poco interés y para facilitar los cálculos de secado se expresa casi siempre el contenido de humedad en kilogramos de agua por kilogramos (o 100 kg) de sólido seco.

La fuerza impulsora para la transferencia de materia en un sólido húmedo es, por tanto la humedad libre  $X$ , que es la diferencia entre la humedad total  $X_T$ , y, la humedad en el equilibrio  $X^*$ .

### 2.2.1 Humedad relativa del proceso

La *humedad relativa* ( $\phi$ ), se define como la relación entre la presión parcial del vapor de agua en la mezcla ( $P_v$ ) y la presión de saturación del vapor de agua pura ( $P_d$ ) a la misma temperatura; o como la relación entre la densidad real del vapor de agua en el aire ( $d_v$ ) y la densidad del vapor en condiciones de saturación ( $d_d$ ) a la misma temperatura.

$$\phi = \left( \frac{P_v}{P_d} \right) * 100 \quad (2.1)$$

$$\phi = \left( \frac{d_v}{d_d} \right) * 100 \quad (2.2)$$

Donde:

$\phi$ : Humedad relativa [ % ]

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

$P_d$ : Presión de saturación del vapor de agua pura [ Pa ]

$d_v$ : Densidad del vapor de agua [ kg / m<sup>3</sup> ]

$d_d$ : Densidad del vapor de agua en condiciones de saturación [ kg / m<sup>3</sup> ]

En otras palabras, la *humedad relativa del aire* es la relación entre la cantidad de vapor de agua presente en un volumen determinado de aire y la mayor cantidad posible de vapor de agua que puede existir en ese volumen de aire a la misma temperatura.

$$\phi = \left( \frac{m_v}{m_d} \right) * 100 \quad (2.3)$$

Donde:

$\phi$ : Humedad relativa [ % ]

$m_v$ : Masa de vapor de agua [ kg ]

$m_d$ : Masa de vapor de agua para saturar el aire húmedo [ kg ]

La humedad relativa del aire está relacionada con la temperatura. Al aumentar la temperatura, aumenta la capacidad de absorción del aire. Esto se debe a que un aire a mayor temperatura necesita mayor cantidad de agua para saturarse que un aire a menor temperatura y por lo tanto podrá absorber mayor cantidad de agua.

#### a) Variación de la Humedad relativa.

La humedad relativa puede ser incrementada de las siguientes maneras:

- Reduciendo la temperatura, sin variar la humedad absoluta.
- Aumentando la humedad absoluta, sin variar la temperatura.

La humedad relativa puede ser disminuida de las siguientes formas:

- Aumentando la temperatura, sin variar la humedad absoluta.
- Disminuyendo la humedad absoluta, sin variar la temperatura.

#### b) Relación entre la humedad relativa del aire y la relación de saturación.

La humedad relativa (  $\phi$  ) y la relación de saturación (  $\mu$  ), se relacionan mediante la siguiente expresión:

$$\phi = \frac{\mu}{1 - (1 - \mu) \left( \frac{P_d}{P_{atm}} \right)} \quad (2.4)$$

Donde:

$\phi$ : Humedad relativa [ adimensional ]

$\mu$ : Relación de Saturación [ adimensional ]

$P_d$ : Presión de saturación del vapor de agua pura [ Pa ]

$P_{atm}$ : Presión atmosférica [ Pa ]

Sin embargo, para fines prácticos, se puede utilizar la siguiente ecuación:

$$\phi = \mu = \frac{W}{W_d} \quad (2.5)$$

Donde:

$\phi$ : Humedad relativa [ adimensional ]

$\mu$ : Relación de saturación [ adimensional ]

W: Humedad específica [ kg vapor de agua / kg aire seco ]

$W_d$ : Humedad específica de saturación [ kg vapor de agua / kg aire seco ]

### c) La Psicrometría aplicada al secado de granos.

La psicrometría es el estudio de las propiedades del aire, como son el calor, la temperatura, humedad, presión de vapor y energía. Su conocimiento, sobre todo de los conceptos esenciales, es definitivo para comprender el por qué del secado de los granos y de las íntimas relaciones que existen entre el aire de secado y los granos.

Es importante definir algunos conceptos relacionados con la mezcla aire-vapor agua.

#### c) Humedad absoluta

Se define como la masa de vapor de agua por unidad de volumen de aire, como se puede ver, no es más que la densidad del vapor.

#### d) Humedad relativa ( $\phi$ )

Esta humedad expresada en porcentaje, es la relación de presión parcial del vapor de agua ( $P_v$ ) en el aire, y la presión de saturación ( $P_d$ .)

#### f) Humedad específica (W)

A menudo se identifica como relación de humedad, es la relación entre a masa de vapor de agua sobre la masa de aire seco.

$$W = \frac{mv}{ma} \quad (2.6)$$

$$w = 0.622 \frac{P_v}{P - P_v} \quad (2.7)$$

Donde:

W = humedad específica del aire [Kgagua/Kg.aire]

mv = masa de vapor de agua [Kg].

$m_a$  = masa de aire seco [Kg].

$P$  = presión barométrica [N/m<sup>2</sup>].

$P_v$  = presión parcial del vapor de agua [N/m<sup>2</sup>].

### g) Temperatura del punto de rocío (PR)

Es la temperatura a la cual el aire se satura cuando se enfría. Si el aire se enfría a una temperatura menor que ésta, empieza la condensación.

### h) Temperatura de bulbo seco y de bulbo húmedo

La temperatura de bulbo seco ( $T_s$ ), es la que se mide con un termómetro ordinario. La temperatura de bulbo húmedo ( $T_h$ ) por el contrario, se determina cubriendo el bulbo con gasa o franela húmeda. La temperatura de bulbo húmedo se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$T_h = T_s - \left[ \frac{(P_{sat} - P_v)}{66.66} \right] \quad (2.8)$$

$T_h$  = temperatura de bulbo húmedo.

$T_s$  = temperatura de bulbo seco.

$P_{sat}$  = presión de saturación del vapor de agua a la temperatura de bulbo húmedo.

$P_v$  = presión parcial del vapor de agua (a la temperatura de bulbo seco).

### i) Calor total del aire para secado

El calor total del aire (entalpía total), es la suma de su calor sensible y su calor latente, es decir:

$$Q = q_s + q_l \quad (2.9)$$

$$q_s = \dot{m}_a * h_a \quad (2.10)$$

$$q_l = \dot{m}_a * (W_w * h_v) \quad (2.11)$$

Donde:

$Q_t$  = calor total del aire húmedo en [KW].

$q_s$  = calor sensible [KW].

$q_l$  = calor latente [KW].

$m_a$  = masa de aire por unidad de tiempo [Kg/s].

$h_a$  = entalpía del aire seco por masa de aire [KJ/Kg].

$h_w$  = entalpía de vapor de agua por masa de agua [KJ/Kg].

Tomando como temperatura referencial 0 °C, para el cálculo de entalpías se tiene:

$$h_a = C_{pa} * T_d \quad (2.12)$$

$$h_v = h_{fg} + C_{pv} T_d \quad (2.13)$$

$C_{pa}$  = calor específico del aire [KJ/Kg °C].

$C_{pv}$  = calor específico del vapor de agua [KJ/Kg °C].

$h_{fg}$  = calor latente de vaporización del agua [KJ/Kg].

$T_d$  = temperatura de bulbo seco [°C].

## 2.2.2 Contenidos de humedad inicial y final del producto

a) **Humedad en "base húmeda"**, que se mide como un porcentaje del peso total de la muestra. Este sistema es el más comúnmente usado en el manejo comercial de los granos.

Matemáticamente se representa como:

$$X_{bh} = \frac{m_a}{m_T} * 100 \quad (2.14)$$

$$m_T = m_s + m_a \quad (2.15)$$

Donde:

$X_{bh}$  = porcentaje de Humedad en base húmeda

$m_T$  = masa total del producto [ kg ]

$m_s$  = masa seca del producto [ kg ]

$m_a$  = masa de agua del producto [ kg ]

b) **Humedad en "base seca"**, que se calcula como un porcentaje de la materia seca, únicamente. Se usa en cálculos científicos, principalmente, y su representación matemática es como sigue:



$$X_{bs} = \frac{m_a}{m_s} * 100 \quad (2.16)$$

Donde:

$X_{bs}$  = porcentaje de Humedad en base seca

### c) Tipos de humedad.

– **Humedad de equilibrio ( $X_{eq}$ ).**

Es la condición en que ni el aire (de proceso o ambiental) ni el Producto absorben ni rechazan humedad.

– **Humedad retenida.**

Es el valor de la mínima humedad de equilibrio del producto en contacto con el aire saturado (humedad relativa 100%).

– **Humedad no retenida.**

Es la humedad en exceso en el producto, en relación al contenido de humedad de equilibrio cuando el material está en contacto con aire saturado.

– **Humedad libre.**

La Humedad libre (de un sólido con respecto al aire), es la diferencia entre la humedad del sólido y la humedad de equilibrio.

$$X_F = X_{bs} - X_{eq} \quad (2.17)$$

Donde:

$X_F$  = porcentaje de Humedad libre

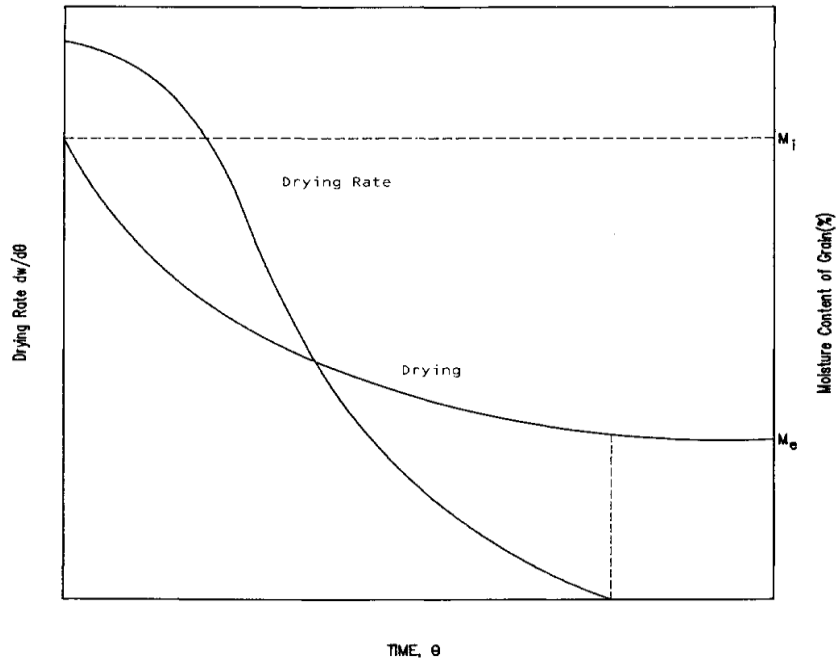
$X_{bs}$  = porcentaje de Humedad en base seca

$X_{eq}$  = porcentaje de Humedad de equilibrio

Por consiguiente, la Humedad libre es la cantidad de agua (o humedad) que puede perder un producto en contacto con aire de condiciones dadas y constantes hasta alcanzar el estado de equilibrio; y depende tanto de la humedad del sólido como de la humedad relativa del aire.

## 2.2.3 Consideraciones para el secado del producto.

En el proceso de secado, el calor es necesario para evaporar la humedad del grano y el flujo de aire es necesario para transportar la humedad evaporada. Hay dos mecanismos básicos involucrados en el proceso de secado: la migración de la humedad de un grano individual hacia su superficie, y la evaporación de la humedad desde la superficie al aire circundante. La tasa de secado está determinada por: el contenido de humedad y la temperatura del grano; y la temperatura, humedad relativa y la velocidad del aire en contacto con el grano.



$M_i$  = Initial Moisture content, and  $M_e$  = Equilibrium Moisture content

**Figura 2.2.** Demuestra el secado de una capa simple de grano expuesta a un flujo constante de aire.

Primero, el contenido de humedad cae rápidamente, pero mientras el grano pierde humedad la tasa de secado disminuye. En general, la tasa de secado disminuye con el contenido de humedad, aumenta con el incremento de la temperatura del aire y disminuye con el incremento de la humedad del aire. A bajas velocidades de flujo de aire aumentar la velocidad provoca un secado más rápido, pero a mayores velocidades el efecto es mínimo; indicando que la difusión de la humedad dentro del grano es el mecanismo gobernante en el sistema.

Los granos son hidroskopios y perderán o ganarán humedad hasta alcanzar el equilibrio con el aire circundante. El contenido de humedad de equilibrio (EMC) depende de la humedad relativa y de la temperatura del aire. En la tabla 2.2., se muestran contenidos de humedad de equilibrio para varios tipos de granos.

**Tabla 2.2** Contenidos de humedad de equilibrio para varios tipos de granos

Grain	Relative Humidity (%)							
	30	40	50	60	70	80	90	100
Equilibrium Moisture Content ( %wb*) at 25°C								
Barkey	8.5	9.7	10.8	12.1	13.5	15.8	19.5	26.8
Shelled Maize	8.3	9.8	11.2	12.9	14.0	15.6	19.6	23.8
Paddy	7.9	9.4	10.8	12.2	13.4	14.8	16.7	-
Milled Rice	9.0	10.3	11.5	12.6	12.8	15.4	18.1	23.6
Socghum	8.6	9.8	11.0	12.0	13.8	15.8	18.8	21.9
Wheat	8.6	9.7	10.9	11.9	13.6	15.7	19.7	25.6

\* wet basic

Source: Brooker *et al* (1974)

La relación entre el contenido de humedad de equilibrio, la humedad relativa y la temperatura para muchos granos ha sido modelada por numerosos investigadores<sup>4</sup>.

Es muy importante apreciar el significado práctico de contenido de humedad de equilibrio. Bajo ninguna circunstancia es posible secar a un contenido de humedad menor que el EMC asociado con la temperatura y humedad del aire de secado. Por ejemplo, los datos de la tabla anterior muestran que el arroz puede secarse hasta un contenido de humedad del 16.7% cuando es expuesto al aire a 25°C y 90% de humedad relativa. Si se requiere arroz con un contenido de humedad menor a 16.7% entonces se tiene que aumentar la temperatura del aire de secado o disminuir su humedad relativa.

El secado en capas delgadas donde todos y cada uno de los granos están completamente expuestos al aire de secado puede ser representado de la siguiente forma:

$$MR = f(T, h, t) \quad (2.18)$$

Relación de humedad [MR]

$$MR = \frac{MC - MC_e}{MC_o - MC_e} \quad (2.19)$$

Donde:

---

<sup>4</sup> Estos resultados han sido resumidos por Brooker *et al.* (1974).

$MC$  = es el contenido de humedad del grano a cualquier nivel o tiempo, % base seca (%db)  
 $MC_e$  = es el contenido de humedad de equilibrio (%db)  
 $MCo$  = es el contenido de humedad inicial del grano húmedo (%db)  
 $T$  = es la temperatura del aire ( $^{\circ}C$ )  
 $h$  = es la humedad relativa del aire  
 $t$  = es el tiempo de secado.

Datos empíricos han sido utilizados para determinar aproximaciones matemáticas de la relación entre la tasa de secado y las condiciones de aire<sup>5</sup>.

Por ejemplo una ecuación de capa delgada para el arroz (Teter 1987) es:

$$MR = \exp(-X * t^Y) \quad (2.20)$$

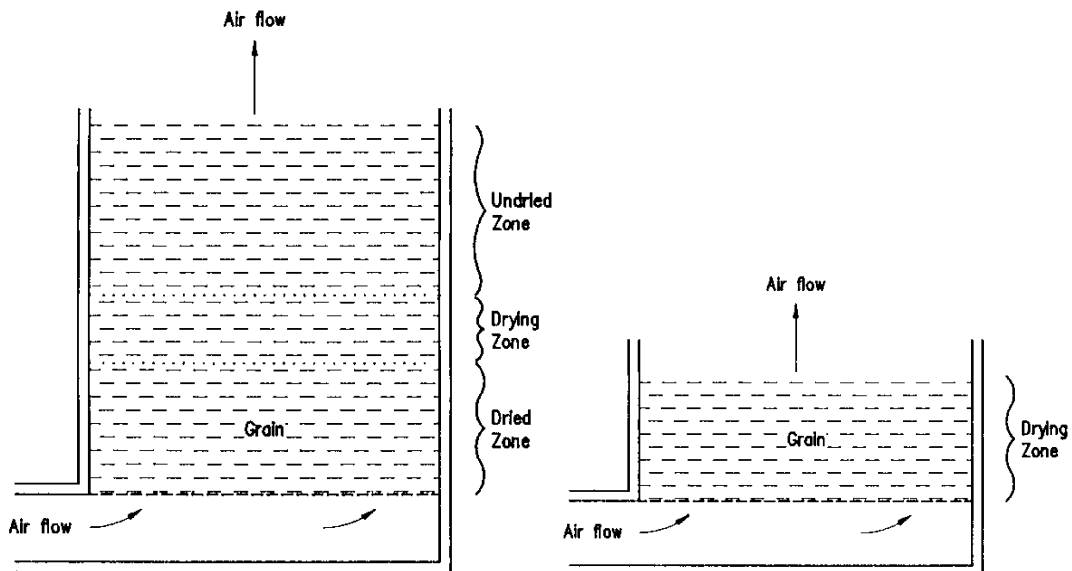
Donde:

$$X = 0.026 - 0.0045h + 0.01215T \quad (2.21)$$

$$Y = 0.013362 + 0.194h - 0.000177h^2 + 0.009468T \quad (2.22)$$

Con  $h$  expresada como porcentaje y  $t$  en  $^{\circ}C$ .

En el secado de granos en un lecho profundo, a pesar de que todos los granos individuales pueden estar perdiendo humedad a tasas diferentes, la tasa de secado general permanecerá constante durante un largo período.



A. Thick drying bed.

B. Shallow drying bed.

<sup>5</sup> Relaciones para muchos granos han sido compiladas por Brook & Foster ,1981

### **Figura 2.3. Tres zonas presentes dentro de un lecho grueso**

El aire absorbe humedad mientras se mueve a través del lecho hasta que se satura por completo y se mueve a través de las capas de grano restantes sin ejercer efecto de secado. La figura 2.3 muestra las tres zonas presentes dentro de un lecho grueso en un tiempo intermedio dentro de la operación de secado. El secado toma lugar dentro de una zona discreta cuyo tamaño depende del contenido de humedad del grano y la temperatura, humedad y velocidad del aire.

Bajo la zona de secado está la zona seca donde el grano está en equilibrio con el aire. Sobre la zona de secado está la zona sin secar, donde el grano permanece sin cambios desde sus condiciones iniciales. En un lecho angosto la zona de secado es mayor que la profundidad del lecho y el secado ocurrirá inicialmente a través de todo el lecho.

Los cambios en la temperatura y humedad del aire, mientras se mueve a través de un lecho de granos, dependen de la tasa a la cual la humedad está siendo evaporada de cada grano como elemento expuesto individualmente. El conocimiento del efecto del contenido de humedad del grano y además de otras propiedades del grano como, la temperatura, humedad y tasa de flujo de aire son esenciales para entender el mecanismo de secado al interior del lecho.

Desafortunadamente no ha sido desarrollada una teoría que describa de manera precisa y práctica la tasa de secado de una capa delgada. Como se describió antes, muchas relaciones empíricas han sido establecidas y tienen que usarse para la estimación del tiempo de secado. La predicción precisa del tiempo de secado es inhibida por la variabilidad de factores clave encontrados en la práctica, particularmente para los sistemas de secado simple que son los más apropiados en países en vía de desarrollo. Por ejemplo el contenido de humedad de granos individuales parece variar considerablemente dentro de lote de granos.

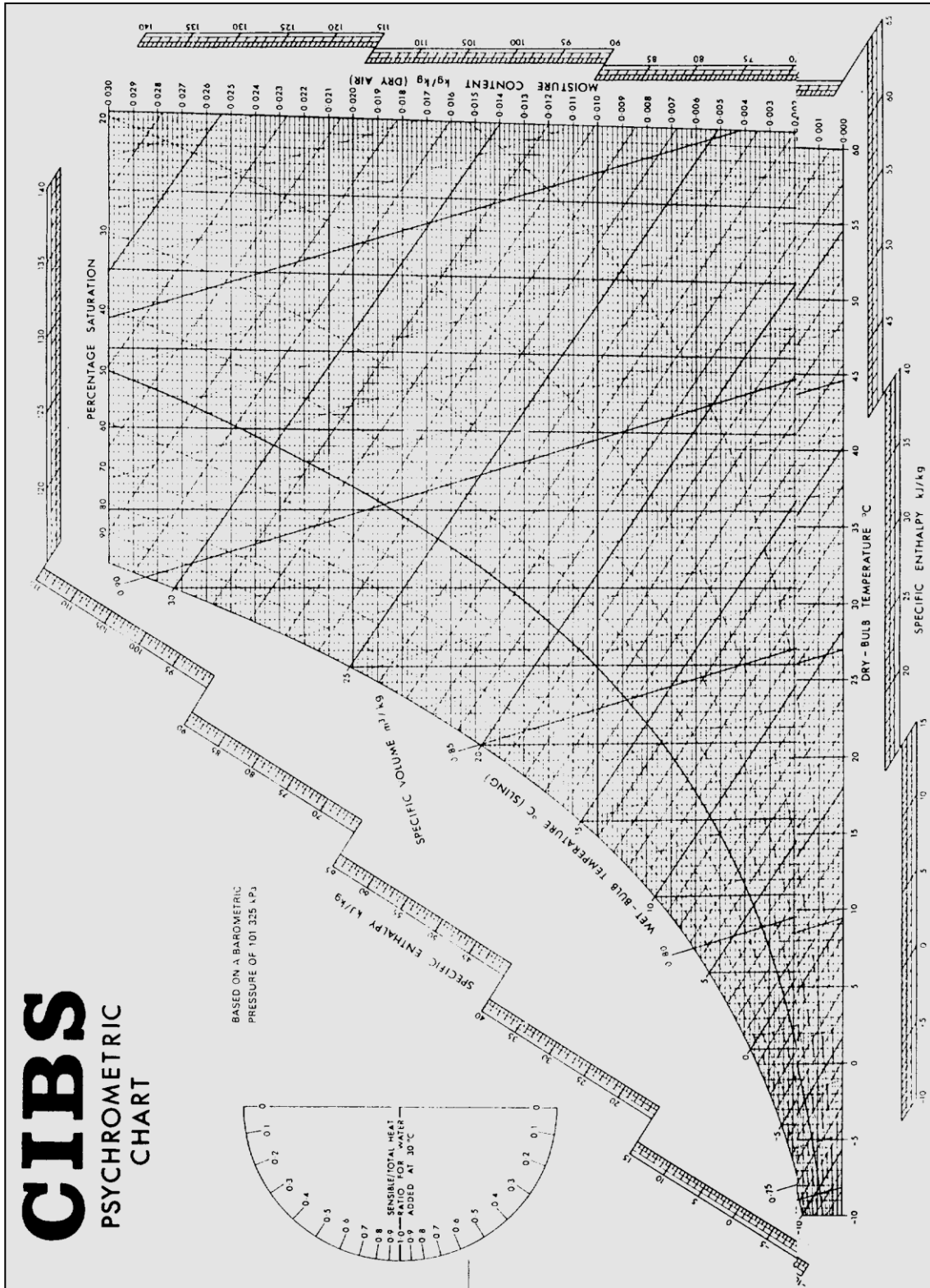
Y en el caso de secadores con una salida constante de calor, la temperatura del aire de secado variará con los cambios de la temperatura del aire ambiente.

#### **a. Propiedades del Aire**

Las propiedades del aire que fluye alrededor del grano son un factor fundamental en la determinación de la tasa de remoción de humedad. La capacidad del aire de remover la humedad depende principalmente de su temperatura y humedad inicial, a mayor temperatura y menor contenido humedad, mayor capacidad de remoción de humedad.

Las relaciones entre la temperatura, humedad y otras propiedades termodinámicas están representadas en las cartas psicrométricas, como se muestra en la figura 2.4.

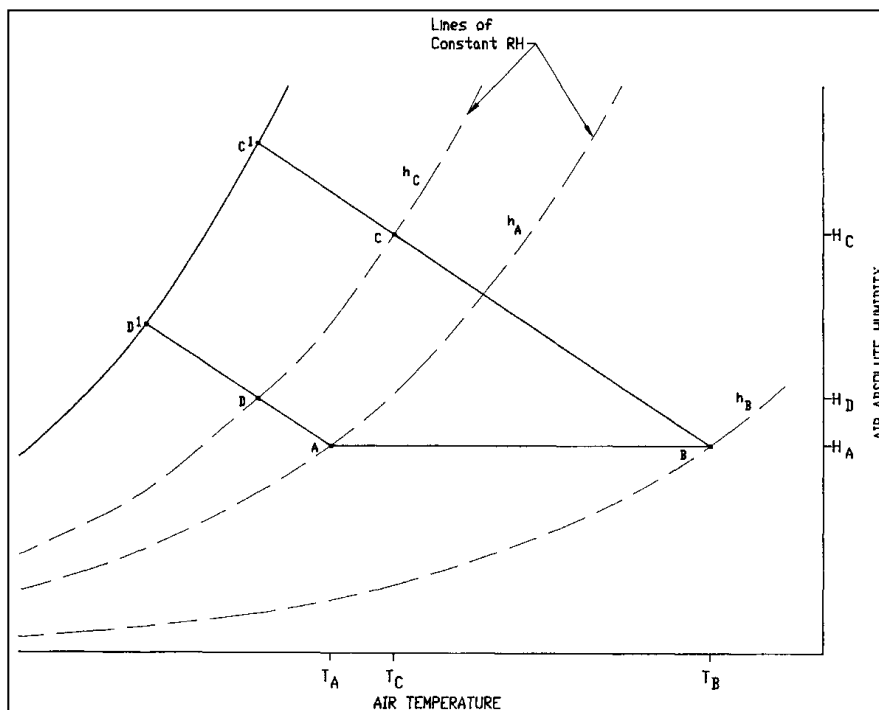
Es importante apreciar la diferencia entre humedad absoluta y relativa. La humedad absoluta es el contenido de humedad del aire (masa de agua por unidad de masa de aire). La humedad relativa es la relación, expresada como porcentaje, entre el contenido de humedad del aire a una temperatura específica y el su contenido máximo de humedad si estuviera saturado a esa temperatura.



**Figura 2.4.** Carta psicrométrica

El aire absorbe humedad mientras se mueve a través del lecho. Bajo un hipotético secado adiabático el calor sensible del aire se convierte en calor latente y el cambio en las condiciones del aire está representado a lo largo de la línea de entalpía constante BC.

El aire habrá incrementado humedad absoluta,  $H_c$ , y humedad relativa,  $h_c$ , pero habrá disminuido su temperatura,  $T_C$ . La absorción de humedad del aire estará dada por la diferencia entre las humedades absolutas entre C y B ( $H_C - H_A$ ).



Si el aire frío fuera pasado a través del lecho, el proceso de secado estaría representado por la línea AD. Asumiendo que el aire en el punto D tuviera la misma humedad relativa,  $h_c$ , que el aire caliente en C, entonces la humedad absorbida sería ( $H_D - H_A$ ), considerablemente menor que la absorbida por el aire calentado ( $H_C - H_A$ ).

### b. Propiedades físicas del grano <sup>6</sup>

#### Contenido de humedad

<sup>6</sup> Información de propiedades físicas y térmicas del grano están disponibles en textos como Brooker et al. (1974) and Brook & Foster (1981).

El contenido de humedad del grano está usualmente medido en base húmeda, masa de agua por unidad de masa de grano húmedo, expresada como X(%) (wb). La medida alternativa se refiere a la medición en base seca (X%) (db), que es la masa de agua por unidad de masa de grano completamente seco. La conversión entre ambas escalas de medida se muestra en la tabla 2.3. Todos los contenidos están dados en base de peso húmedo, a menos que se diga lo contrario.

Tabla 2.3 Conversión del contenido de humedad.

Conversión del contenido de humedad Base húmeda			
	Base Seca	Base húmeda	Base Seca
[%]			
10.0	11.0	[%]	
11.0	12.3	21.0	26.5
12.0	13.6	22.0	28.2
13.0	15.0	23.0	29.9
14.0	16.3	24.0	31.6
15.0	17.6	25.0	33.3
16.0	19.0	26.0	35.1
17.0	20.5	27.0	37.0
18.0	21.9	28.0	38.9
19.0	23.5	29.0	40.8
20.0	25.0	30.0	42.8

Tabla 2.4. Masa de agua perdida por el grano húmedo durante el secado



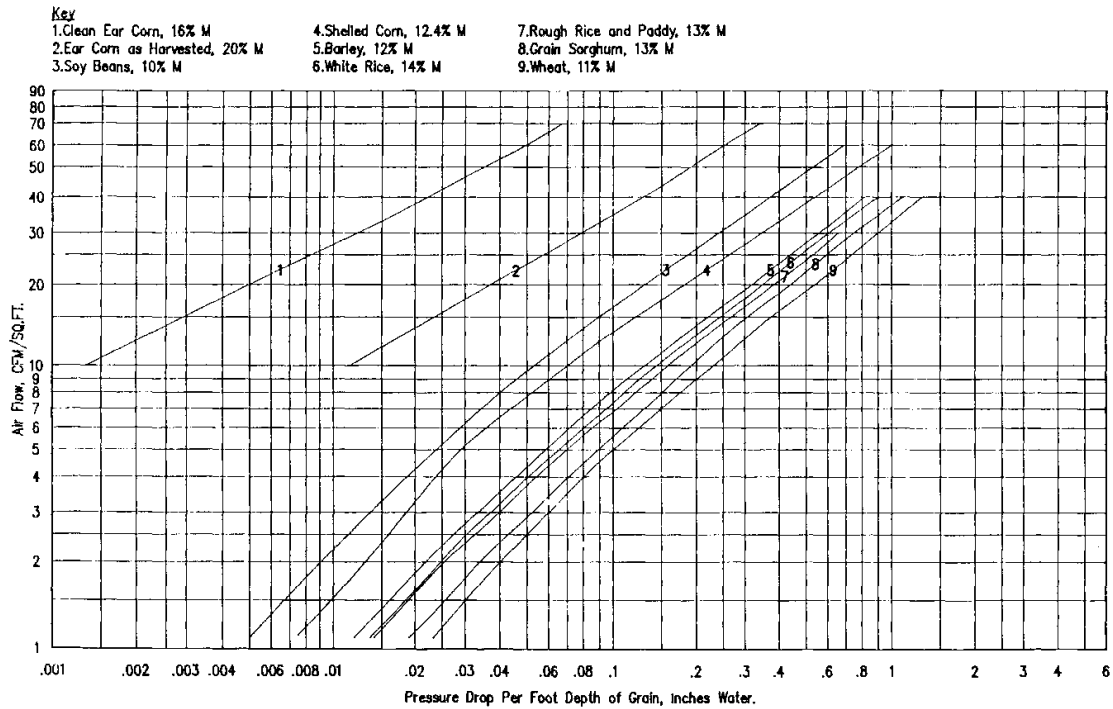
Initial Moisture Content %(wb)	Final Moisture Content %(wb)								
	19	18	17	16	15	14	13	12	11
	Moisture Loss (kg/tonne)								
30	136	146	157	167	<del>176</del>	186	195	205	213
29	125	134	145	<del>155</del>	165	174	184	193	202
28	111	122	133	143	153	163	172	182	191
27	99	110	120	131	141	151	161	170	180
26	86	98	108	119	129	140	149	159	169
25	74	85	96	107	118	128	138	148	157
24	62	73	84	95	106	116	126	136	146
23	49	61	72	83	94	105	115	125	135
22	37	49	60	71	82	93	103	114	124
21	25	37	48	60	71	81	92	102	112
20	12	24	36	48	59	70	80	91	101
19		12	24	36	47	58	69	80	90
18			12	24	35	47	57	68	79
17				12	24	35	46	57	67
16					12	23	35	45	56
15						12	23	34	45

#### Densidad volumétrica.

La densidad volumétrica del grano es el peso por unidad de volumen. El contenido de humedad tiene un afecto apreciable en la densidad

#### Resistencia al flujo de aire

La energía requerida para forzar el aire a través de un lecho de grano depende del flujo del aire, la profundidad del lecho y propiedades físicas como su superficie, factores de forma, distribución del tamaño de grano, contenido de humedad, cantidad y naturaleza de impurezas como piedras, hojas, entre otros.



**Figura 2.6.** La relación entre el flujo de aire y caída de presión

La relación entre el flujo de aire y la caída de presión generada a través del lecho para granos seleccionados se muestra en la [figura 2.6](#). La información se refiere a grano limpio y seco. Factores de corrección de hasta 1.4 se utilizan para grano muy húmedo y sucio.

#### Calor latente de vaporización.

Debe suministrarse energía en forma de calor para evaporar la humedad del grano. El calor latente de vaporización, para un grano depende de su contenido de humedad y temperatura y es apreciablemente mayor que el calor latente de vaporización del agua. En la ilustración (Tabla 2.5)<sup>7</sup> se muestran calores latentes de vaporización para con contenido de humedad y temperatura seleccionados.

**Tabla 2.5.** Calores latentes de Vaporización

<sup>7</sup> Información para otros granos han sido reportados por Broker, 1974

Temperature °C	Latent Heat of Vaporization (kJ/kg)					
	Free Water	Moisture Content %(wb)				
		14	16	18	20	22
25	2,443	2,605	2,518	2,483	2,464	2,453
30	2,431	2,593	2,506	2,471	2,452	2,441
35	2,419	2,580	2,493	2,458	2,440	2,429
40	2,407	2,567	2,482	2,447	2,428	2,417
45	2,395	2,555	2,469	2,434	2,416	2,405
50	2,383	2,542	2,456	2,422	2,404	2,393
55	2,371	2,529	2,444	2,410	2,391	2,381
60	2,359	2,516	2,432	2,398	2,379	2,369

## 2.2.4 Métodos de secado

El secado de granos frecuentemente es el eje del proceso integral de cosecha-secado-almacenamiento. El método de secado generalmente es el principal factor que determina la selección de otros componentes del sistema de manejo de granos. En los países en desarrollo, los métodos disponibles para secar los productos agrícolas a nivel del agricultor están limitados, la mayoría de las veces, al uso de una combinación de radiación solar y el movimiento natural del aire ambiente: o sea, el secado natural. Otros métodos de secado son, en cierto modo, complejos y requieren de una mayor experiencia y esfuerzo de parte del agricultor; éstos corresponden al secado artificial.

Los métodos para el secado artificial de granos se dividen, de una manera general, en dos clases principales: aquella en la que el grano se seca por lotes y aquella en que el grano se seca por medio de un flujo continuo. Los métodos de secado se deben elegir en función del clima, economía y circunstancias sociales bajo los cuales van a ser empleados. Esto es especialmente importante cuando existen métodos que ya han sido empleados desde hace mucho tiempo por los agricultores de una comunidad. Los métodos alternativos no pueden ser recomendados sin una investigación previa de todas las posibles consecuencias, ya sean positivas o negativas, para los agricultores.

### a) Secado natural

Se entiende por secado natural aquél en que el movimiento del aire de secado se debe a la acción de los vientos, y la energía para evaporar la humedad proviene de la capacidad de secado del aire y de la incidencia directa de la energía solar (figura 2.7). El secado natural en el campo se realiza directamente en la planta y después de la cosecha, cuando se colocan las espigas y mazorcas en montones, pilas, manojos o hileras que se dejan secar al sol.

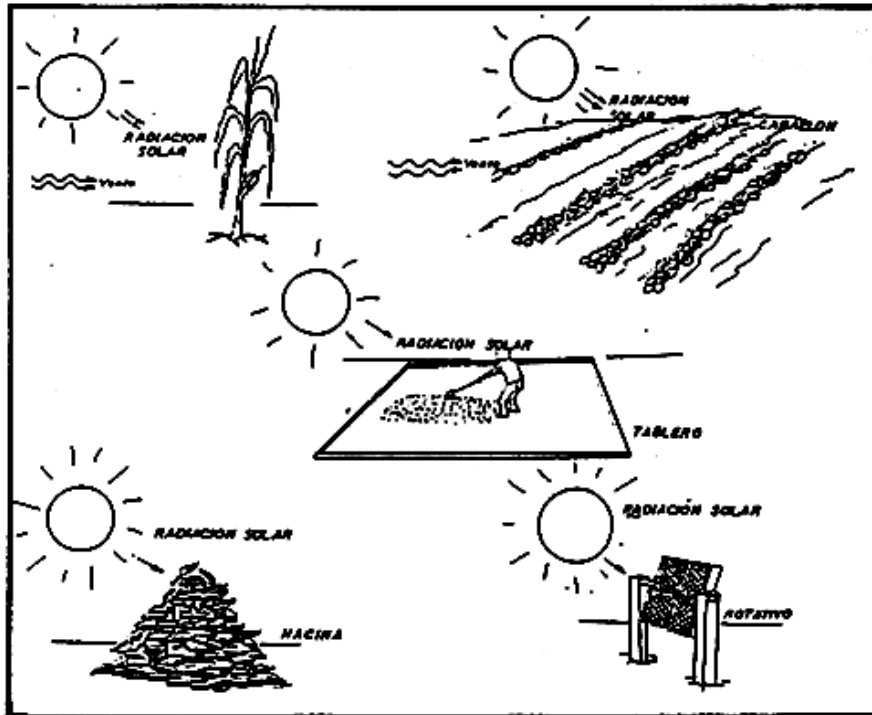


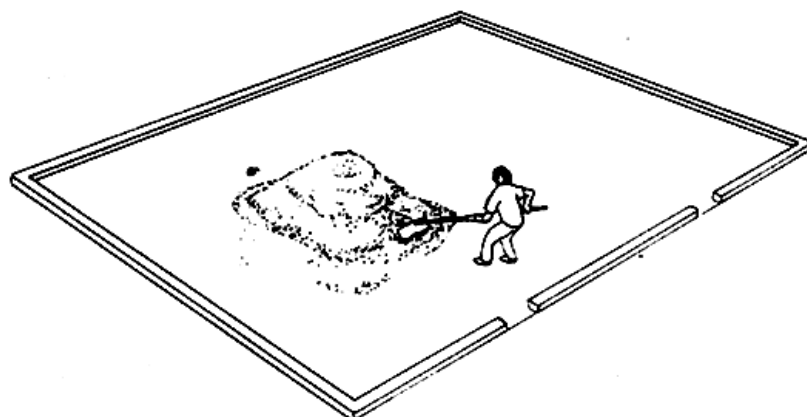
Figura 2.7. Diversas formas de secado natural.

Para reducir el tiempo de secado es común construir patios de secado o secadores simples que aprovechan la acción del viento y la energía solar. Este método de secado es muy utilizado por la mayoría de los agricultores de los países en vías de desarrollo, a veces por desconocimiento de técnicas más modernas y porque las condiciones climáticas permiten su uso a un costo muy reducido. Otra gran limitante para el uso de tecnologías más elaboradas lo constituye el nivel de inversiones que se requiere y que, por lo general, se encuentran muy por encima de las posibilidades de muchos productores rurales.

Existen algunas estructuras simples para el secado natural de granos, cuyo uso ha sido comprobado en algunas regiones de América Latina. Su utilización depende, en general, del clima del lugar y tienen en común que son simples y fáciles de construir; su costo es bajo y los materiales de construcción se encuentran fácilmente en la localidad.

**b) Secado en patios**

El patio es un piso de ladrillos, de hormigón o de tierra compactada que se construye en un



TABLERO DE ALBANLERIA

lugar plano y asoleado. Cuando es de ladrillos, se cubre con una mezcla de cemento y arena, y en sus bordes se construye un pequeño muro de 10 centímetros de alto. El piso de los patios debe tener una inclinación mínima de 1,5 por ciento para facilitar el deslizamiento de las aguas de lluvia (figura 2.8). El secado en patios es un proceso natural, que consiste en esparcir el producto sobre un piso, en capas generalmente de menos de 10 centímetros de espesor. El secado se realiza por la acción del viento y la energía solar que incide sobre la superficie de los granos; por ello es necesario mezclar frecuentemente el producto para que el secado sea homogéneo.

**Figura 2.8.** Patio para el secado de granos.

El uso de patios para el secado de granos está muy difundido, debido a la simplicidad de su construcción y operación, al bajo costo inicial y a su versatilidad, ya que pueden ser secados casi todos los tipos de granos.

Dimensiones. El área de un patio de secado se calcula en base a la producción media esperada, tiempo aproximado de secado, días destinados a la cosecha y espesor de la capa de granos que se esparce sobre el patio. La siguiente fórmula se puede emplear para calcular el área de secado, considerando que la capa de granos tendrá 5 centímetros de espesor:

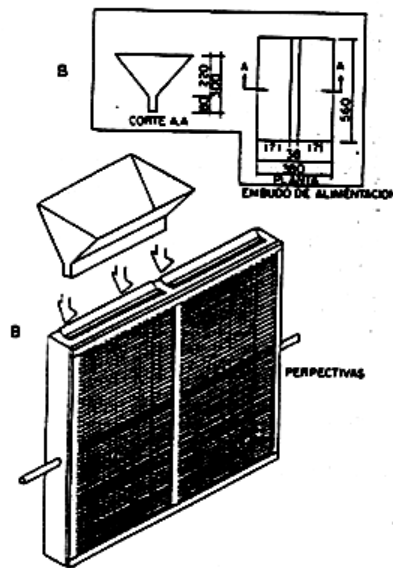
$$A = \frac{20PT}{N} \quad (2.23)$$

- A      área del patio en metros cuadrados
- P      producción media de la cosecha en metros cúbicos
- T      tiempo medio de secado en la región, expresado en días
- N      número de días en que se realiza la cosecha

### **c) Secador solar rotativo**

El secador solar rotativo consta de una caja de madera con el frente y el fondo de tela de alambre. La caja tiene un eje central, que es un tubo de hierro galvanizado de 3/4 de pulgada, que se apoya en dos pequeños pilares de madera, que permiten la rotación. El secador es de inclinación variable, y su eje de rotación está alineado en la dirección norte-sur. La inclinación debe acompañar los movimientos del sol para aprovechar mejor la energía solar, por lo que el secador se debe mover de posición varias veces durante el día (figura 2.9).

Las variables que influyen en el proceso de secado, en el secador rotativo, son las mismas que en el secado de patios. La diferencia principal radica en que los secadores rotativos, además de aprovechar mejor la energía solar, aprovechan también la acción del viento. El secador solar rotativo es una opción para el secado de granos a nivel del pequeño, agricultor y puede sustituir totalmente el uso de los patios.



**Figura 2.8.** Secador solar rotativo

A = Embudo de alimentación

B = Vista general.

El secador solar rotativo puede ser utilizado para todo tipo de granos; sin embargo, se debe tener cuidado de que los orificios de la malla de alambre que se utiliza en su construcción sean lo suficientemente pequeños para evitar la salida del producto que va a secarse.

### c) Secado artificial

Para el secado artificial de granos existen básicamente dos métodos: uno que emplea altas temperaturas (entre 45 y 120 °C, o más en algunos casos) y el otro, que emplea bajas temperaturas. El secado a bajas temperaturas (con o sin calentamiento suplementario del aire de secado) es un proceso de gran eficiencia energética, con el cual se obtiene un producto final de óptima calidad cuando se realiza en forma adecuada, ya que la temperatura sólo se incrementa unos pocos grados más arriba de la temperatura ambiente (1–5°C).

El principal problema que se presenta en el secado de granos a bajas temperaturas lo constituye el peligro de deterioración del producto debido al largo tiempo que se requiere para el secado. El secado artificial con altas temperaturas es más rápido; sin embargo, la eficiencia energética es menor.

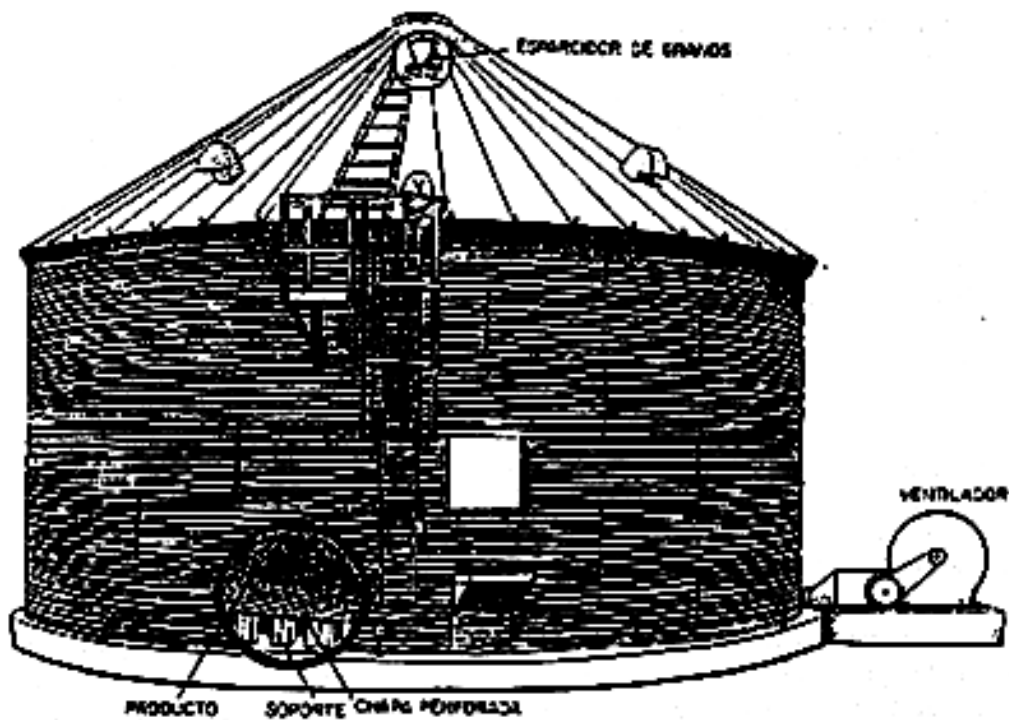
Los sistemas para el secado artificial de granos están constituidos por un ventilador que mueve el aire y que lo fuerza a pasar por la masa de granos, una cámara para contener el grano y un quemador que permite aumentar la temperatura del aire de secado. Cuando el

grano se va a secar en flujos continuos, los secadores requieren equipos especiales para llenarlos con granos húmedos y para vaciarlos cuando los granos están secos, En los secadores estacionarios o por lotes, el grano se retira del secador después que se ha secado y enfriado. Cuando el secado se realiza a bajas temperatura, el grano puede ser almacenado en el lugar del secado.

#### **d) Secado a bajas temperaturas**

El secado a bajas temperaturas es el método artificial de secado que utiliza aire natural o ligeramente caliente (1 a 5 °C arriba de la temperatura ambiente). Generalmente, este proceso se realiza en silos secadores- almacenadores, donde el producto permanece almacenado después del secado (figura 2.9). Para poder utilizar un silo se requieren algunas características especiales que no son necesarias para los silos que se emplean solamente para el almacenamiento. La primera característica se refiere al piso que debe consistir en una placa metálica que tenga por lo menos el 10 por ciento del área perforada para facilitar la distribución uniforme del aire, lo cual es muy importante para la eficiencia del proceso. El ventilador debe proveer la cantidad suficiente de aire para secar toda la masa de granos, sin que se presente deterioro. Las dimensiones del silo (diámetro y altura) se tienen que elegir de acuerdo a la potencia del ventilador.

El secado a bajas temperaturas es similar al secado natural en el campo. El producto pierde humedad hasta que se establece el equilibrio entre la humedad del aire y la humedad del grano. Como este proceso es lento, al final casi toda la masa de granos queda en equilibrio térmico e higroscópico con las condiciones psicrométricas del ambiente. La diferencia entre los dos tipos de secado lo constituye la forma de mover el aire: en el secado a bajas temperaturas, el aire es forzado a pasar por la masa de granos por medio de un ventilador, mientras que en el campo, el secado se realiza por la acción del viento.



**Figura 2.9** Silo con el piso perforado para secado.

Las condiciones atmosféricas (humedad relativa y temperatura ambiente) bajo las cuales se realiza el secado determinan la humedad final que puede alcanzar la masa de granos, ya que cada combinación de temperatura y humedad relativa del aire corresponde a un contenido de humedad en equilibrio con el producto y este contenido varía para cada producto.

En la tabla 2.6 muestra el tiempo que puede permanecer el maíz en, determinadas condiciones de humedad y de temperatura, sin que la pérdida de materia seca supere el 0,5 por ciento. Estos valores se obtuvieron utilizando el modelo matemático de deterioro propuesto por Steele (Thompson, 1972). Los datos del cuadro se elaboraron bajo condiciones constantes de humedad y temperatura del producto. Es importante recordar que el secado a bajas temperaturas es un proceso dinámico y que si la masa de granos se deja en un silo sin ventilación, con alto contenido de humedad, podrá deteriorarse en menos tiempo que el previsto en la tabla 2.2. Sin ventilación, los granos se calentarán como resultado de su proceso respiratorio y del de los hongos, acelerando el proceso de deterioración.

**Tabla 2.6.** Tiempo en días que pueden permanecer los granos de maíz en determinadas condiciones para que la pérdida de materia seca, no supere el 0,5%.

Temperatura de los granos (°C)	Contenido de humedad (% b.h.)				
	16	18	20	22	24



16	158	60	27	16	11
18	116	45	23	14	9
20	94	36	18	11	8
22	78	29	15	9	6
24	63	24	12	8	5
26	51	19	10	6	5
28	41	16	8	5	4
30	33	13	7	4	3

## 2.2.4 Tiempos de proceso

El tiempo total de secado, es el transcurrido para poder obtener el nivel deseado de humedad en el producto, es igual a la suma del tiempo para el periodo de velocidad constante más el correspondiente al período de velocidad decreciente, es decir,

$$t_T = t_c + t_d \quad (2.24)$$

Donde,

$t_T$  = tiempo total de secado [s].

$t_c$  = tiempo de secado del periodo constante [s].

$t_d$  = tiempo de secado del período decreciente [s].

El tiempo para el período de velocidad de secado constante, es el transcurrido desde el inicio del secado hasta conseguir el contenido crítico de humedad, en donde a su vez, el tiempo para el período de velocidad decreciente empieza, el cual transcurre hasta cuando se ha alcanzado el grado de secado deseado. Para poder determinar estos tiempos, se parte de la definición de velocidad de secado que matemáticamente se puede escribir como,

$$R = \frac{dx_d}{dt} \quad (2.25)$$

Donde,

$R$  = velocidad de secado [ $\text{Kg}_{\text{agua}}/\text{s Kg}_{\text{sólido seco}}$ ].

$dx_d$  = variación de la humedad en el producto [ $\text{Kg}_{\text{agua}}/\text{Kg}_{\text{sólido seco}}$ ].

$dt$  = variación del tiempo de secado [s].

Entonces el tiempo para el período de velocidad constante, integrando la ecuación (2.14), será,

$$t_c = \frac{(x_{di} - x_{dc})}{R_c} q \quad (2.26)$$

Donde,

$x_{di}$  = humedad inicial del producto [Kg<sub>agua</sub>/Kg<sub>sólido seco</sub>].

$x_{dc}$  = humedad crítica del producto [Kg<sub>agua</sub>/Kg<sub>sólido seco</sub>].

$R_c$  = velocidad de secado constante [Kg<sub>agua</sub>/s Kg<sub>sólido seco</sub>].

Para el periodo decreciente de secado, generalmente se tiene dos zonas, sin embargo con frecuencia esta curva decreciente se puede tomar como una línea recta entre los puntos C y D, lo cual es adoptado debido a la falta de datos<sup>8</sup>. Por lo tanto el tiempo de secado, integrando la ecuación (2.25), para este período es,

$$td = \frac{1}{R_c} (x_{dc} - x_{de}) \ln \frac{(x_{dc} - x_{de})}{(x_{df} - x_{de})} \quad (2.27)$$

Donde,

$x_{de}$  = humedad de equilibrio [Kg<sub>agua</sub>/Kg<sub>sólido seco</sub>]

$x_{df}$  = humedad final en el producto [Kg<sub>agua</sub>/Kg<sub>sólido seco</sub>].

Por lo tanto, el tiempo total de secado será,

$$t_T = \frac{1}{R_c} [(x_{di} - x_{dc}) + (x_{dc} - x_{de}) \ln \frac{(x_{dc} - x_{de})}{(x_{df} - x_{de})}] \quad (2.28)$$

Para calcular el tiempo de secado, es necesario conocer la humedad crítica del material, cuya determinación es difícil, sin embargo, para productos que presentan períodos de velocidad de secado de una sola etapa y que además cuando esta velocidad es igual a cero, la humedad de equilibrio respectiva es también cero, la humedad crítica usualmente es aquella, cantidad que el producto tiene, cuando  $a_w$  empieza a caer bajo 1.0 en una curva de equilibrio higroscópico<sup>9</sup>

En cuanto a la velocidad de secado constante, ésta puede ser calculada a partir de consideraciones de transferencia de calor o transferencia de masa<sup>10</sup>:

$$R_c = h \frac{(t_d - T_s)}{h_{fg}} \frac{A}{S_d} \quad (2.29)$$

<sup>8</sup> TREYBAL, Robert, Operaciones de Transferencia de Masa, 2da- Edición, México, McGraw-Hill, 1980, 741

<sup>9</sup> SALTOS, H.A., Traducción Autorizada del Capítulo Octavo 'Deshidratación\*' del Libro Fundamentos de Ingeniería de Procesos en Alimentos p 23.

<sup>10</sup> SALTOS, H.A., Traducción Autorizada del Capítulo Octavo 'Deshidratación' del Libro Fundamentos de Ingeniería de Procesos en Alimentos, p 25-27.

Donde,

$A$  = superficie expuesta del producto =  $S_d / d \delta_d$  [ $m^2$ ].

$\delta_d$  = densidad de la materia seca [ $Kg/m^3$ ].

$d$  = profundidad de la sección inferior del material (si el secado ocurre por ambos lados será la mitad del grosor del sólido) [ $m$ ].

$T_d$  = temperatura de bulbo seco del aire [ $^{\circ}K$ ].

$T_s$  = Temperatura de la superficie del material (igual a la temperatura de bulbo húmedo en el período de velocidad constante) [ $^{\circ}K$ ]

$h_{fg}$  = calor latente de vaporización [ $J/Kg$ ]

$h$  = coeficiente de transferencia de calor [ $W/m^2 \text{ } ^{\circ}K$ ].

## 2.2.6 Características del producto

El conocimiento de la estructura física y química de los granos, tanto cereales como leguminosas, es fundamental para su eficiente manejo poscosecha. *Los cereales y leguminosas son seres vivos que, como tales, cumplen todas las funciones vitales, siendo la respiración la más importante desde el punto de vista del almacenamiento, ya que este proceso degrada el almidón en azúcares, consumiendo oxígeno, generando anhídrido carbónico y liberando calor y agua.*

### a) Estructura física básica de los cereales

Todos los cereales: maíz, arroz, trigo, sorgo, etc., pertenecen a la familia de las gramíneas. Cada grano de los cereales constituye un fruto del tipo cariósipide, cuya única semilla está íntimamente adherida al pericarpio.

Las partes estructurales de un grano de cereal son el pericarpio, el endospermo y el embrión o germen. El pericarpio es la envoltura exterior del grano, encargada de regular el intercambio con el exterior y puede ser atravesado por microorganismos y gases. Constituye una barrera natural contra los agentes de deterioro y es de vital importancia para la conservación del grano.

El endospermo, llamado albumen, constituye la casi totalidad del interior del grano, A veces se encuentran las reservas en forma de glúcidos en las gramíneas, y en otros casos, en forma proteica o lipídica en las leguminosas y oleaginosas.

El embrión o germen es la parte fundamental de la semilla. En los cereales está constituido por el *scutellum* y la plántula y en el maíz, posee elevado contenido de lípidos.

La estructura física y química de los granos es importante para su manejo poscosecha, puesto que el tamaño, forma, composición química y relación porcentual entre sus partes, determina las condiciones de almacenamiento y procesamiento industrial.

### **b) Estructura del grano de maíz**

Las estructuras básicas del grano de maíz son el pericarpio, el endospermo y el embrión o germen.

El Pericarpio es la cubierta celulósica del grano, constituida por cuatro capas de células diferenciadas que son la epidermis, el mesocarpio, las células cruzadas y las células tubulares.

El Endospermo es la parte interior del grano, constituido en su casi totalidad, por hidratos de carbono en forma de almidón. El tipo, proporción y distribución de los almidones depende de la variedad de maíz. El maíz duro tiene endospermo córneo y el maíz suave tiene endospermo harinoso.

El Embrión o Germen es el constituyente vivo de la semilla, que dará origen a la nueva planta. Está constituido por hidratos de carbono, celulosa, proteínas y materias grasas.

### **c) Estructura física básica de las leguminosas**

Todos los granos contenidos en vainas, como el fréjol, arveja, haba, lenteja, chocho, soya y otros, pertenecen a la familia de las leguminosas. El fruto de las leguminosas tipos legumbre, es una vaina constituida por diferentes capas, en cuyo interior se encuentran las semillas que constituyen la parte comestible.

Las capas que constituyen la vaina son el *pericarpio*, el *exocarpio*, el *mesocarpio* y el *endocarpio*. Durante el desarrollo de la planta, estas capas son gruesas y carnosas, pero en la fase de maduración la vaina pierde humedad y adquiere consistencia apergaminada.

La semilla de las leguminosas tiene estructura similar a la de las gramíneas y sus partes principales son *pericarpio*, *endospermo* y *embrión*. Se diferencian de las semillas de gramíneas porque tiene dos cotiledones que encierran el germen.

## **2.2.7 Parámetros del proceso de secado**

Los sistemas de secado más utilizados para granos se pueden catalogar de acuerdo a varios criterios:

El momento del secado:

- a) El secado natural, que se realiza en el campo, antes de separar el grano de la planta como en el caso del maíz, cuando se deja doblado por un período de tiempo antes de la cosecha. El secado natural es en general, un proceso lento que depende y es afectado por muchos factores que no son controlables por el hombre.
- b) El secado artificial, que es todo aquel que usa medios mecánicos o manuales para bajar el nivel de humedad del producto, una vez que éste ha sido cosechado. En ésta categoría se encuentran todas las secadoras mecánicas y también el secado al sol.

#### **Temperatura del aire de secado**

- a) Secado con aire natural, que no usa calentamiento adicional.
- b) Secado con aire caliente, que usa una fuente externa de calor para aumentar el poder de absorción de humedad que tiene el aire.

#### **Sistema de insuflar el aire de secado**

- a) Secado con ventilación natural, cuando no hay sistema mecánico para mover el aire.
- b) Secado con ventilación forzada, cuando se usa un ventilador para tal efecto.

#### **Duración del proceso de secado**

- a) Puede ser un secado lento como el que se realiza en silos metálicos, especialmente en países de zonas templadas y frías. Este proceso puede durar varias semanas y no es recomendable para las zonas tropicales.
- b) Secado rápido, cuando se produce en tiempos no mayores a unas horas. Las condiciones ambientales de las zonas tropicales y subtropicales y las condiciones de humedad de los productos, obliga casi siempre a utilizar sistemas de secado artificial relativamente rápido, si se desea conservar la calidad del producto.

## **2.3 Biomasa**

El término biomasa se aplica, en sentido amplio, a todo material que forma parte de los seres vivos (microorganismos, plantas o animales). Se caracteriza por estar hecha a base de compuestos de carbono reducido y poseer un carácter energético, orgánico y no fósil. En sentido restringido, la biomasa es el resultado del proceso de la fotosíntesis (madera, cultivos agrícolas, algas y microorganismos fotosintéticos). El material vegetal es posteriormente procesado (alimentación animal o procesos tecnológicos de las industrias agroalimentarias) y

genera residuos o subproductos. En este último sentido se pueden distinguir, por tanto, dos tipos de biomasa:

- a) Biomasa de calidad o primaria. La que se produce por conversión directa de energía solar en energía química, bien espontáneamente, como son bosques, selvas, etc., o bien con propósitos específicos por parte del hombre, como es el caso de la agricultura o cultivo industrial de microorganismos. Sirve para cubrir necesidades primarias del hombre, como alimentación, o secundarias, como productos industriales, papel, fármacos, etc.
- b) Residuos o biomasa secundaria y terciaria. La residual que queda tras la utilización por animales de la biomasa primaria. Esta biomasa puede tener diversos orígenes (agrícola, forestal, industrial o urbano). Hasta ahora no tiene valor energético significativo, y crea tres tipos de problemas inmediatos: acumulación, transporte y eliminación. La biomasa secundaria y terciaria constituye hoy un objetivo de interés para la industria de la fermentación.

La naturaleza convierte incesantemente la energía solar en biomasa con una eficiencia media del 0,1 por 100.

La energía de la biomasa almacenada en la superficie de la Tierra equivale a las reservas probadas de combustibles fósiles, y la energía total almacenada como carbón fósil ( $85 \times 10^{10}$  tce) representa sólo unos cien años de fotosíntesis neta ( $8,4 \times 10^{10}$  tce).

**Tabla 2.7.** Recursos fósiles y producción anual de biomasa en el mundo

<b>Recursos o biomasa</b>	<b>Energía almacenada (tce)</b>
Carbón	$85 \times 10^{10}$
Petróleo	$5 \times 10^{10}$
Gas	$3 \times 10^{10}$
Gas y petróleo no convencionales	$20 \times 10^{10}$
	<b><math>113 \times 10^{10}</math></b>
<b>Biomasa:</b>	
Producción primaria neta	$8 \times 10^{10}$
Cultivos terrestres	$0,4 \times 10^{10}$
	<b><math>8,4 \times 10^{10}</math></b>

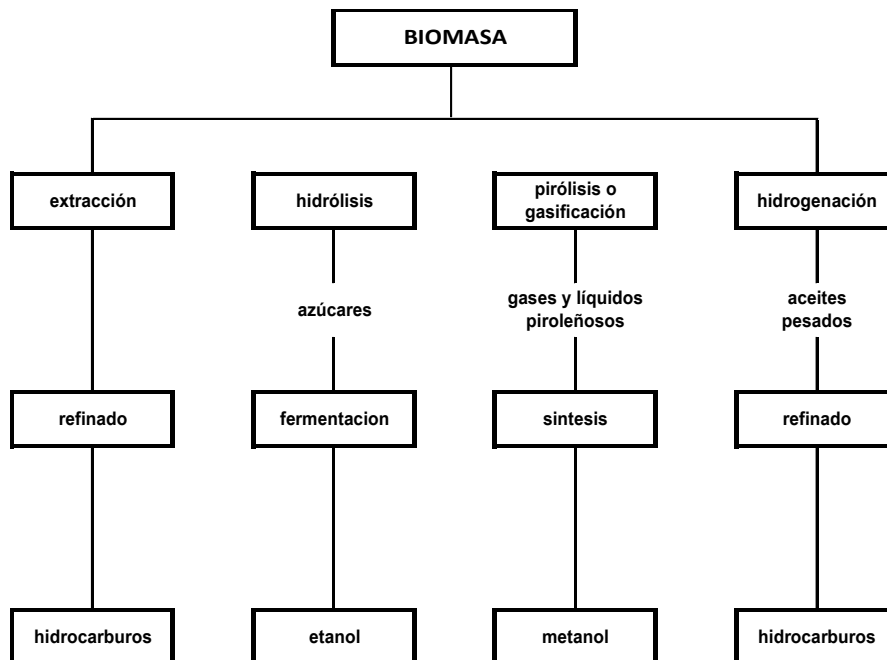
### 2.3.1 Combustión de Biomasa

Hoy se sabe que los combustibles fósiles tienen su origen en enormes cantidades de biomasa que quedaron sepultadas como consecuencia de cataclismos y que sufrieron un lento proceso de transformación. La idea de aprovechar la biomasa como fuente energética no es nueva, ya que desde la más remota antigüedad, el hombre viene utilizando para tal fin, desde la leña hasta los excrementos del ganado.

En general, la biomasa no se puede usar directamente como combustible, salvo en raras ocasiones. Algunos combustibles pueden obtenerse de la biomasa por extracción (hidrocarburos), pero es más común someter la biomasa a distintas transformaciones, según su naturaleza y contenido en agua, para su conversión en combustible.

Estas transformaciones pueden ser: procesos químicos por vía húmeda (hidrólisis), bioquímicos (fermentación para la formación de etanol) y termoquímicos (combustión, pirólisis o gasificación para la producción de metanol o hidrocarburos).

La hidrólisis y la fermentación son muy adecuadas para la biomasa agrícola y acuática (algas), por su elevado contenido en agua. Los procesos termoquímicos son especialmente idóneos para la biomasa forestal (leña, madera, etc.) con bajo contenido en cenizas (< 2 por 100) y azufre (< 0,1 por 100) y composición en C, H y O casi constante (fórmula bruta  $CH_{1,44}O_{0,55}$ ).



**Figura 2.10** Técnicas de producción a partir de biomasa

### 2.3.1.1 Biodiesel

Su energía específica es un 5% menor que la del gasoil, pero su elevada lubricidad compensa esta diferencia, por lo que el rendimiento energético (consumo y potencia) de ambos combustibles es esencialmente el mismo.

La lubricidad del BIODIESEL es notable; duplica la vida útil de los motores que lo utilizan. Por este motivo se lo usa mezclado con el gasoil actual de bajo tenor de azufre, para mejorar la lubricidad de éste. Su mezcla también mejora el índice de cetanos del gasoil fósil.

La fabricación del BIODIESEL es sencilla, y no requiere de economías de escala: se parte de un aceite vegetal, que se somete a un proceso químico sencillo, llamado "transesterificación". Como resultante de esto se obtiene BIODIESEL, y un subproducto genéricamente conocido como glicerol, que tiene más de 1600 usos en el agro, la industria, la medicina, los cosméticos, y la alimentación.

La transesterificación puede hacerse a temperatura ambiente, mediante mezcla mecánica de un alcohol, un álcali, y el aceite vegetal. Al cabo de un cierto tiempo de reposo, se separan por decantación el BIODIESEL y el glicerol. El alcohol se utiliza en una proporción del 15 al 20%, y el álcali es menos del 1% de la mezcla inicial. La proporción de alcohol utilizada es similar a la proporción de glicerol que se obtiene como subproducto. Se puede recuperar una parte del alcohol usado durante el proceso, pero no lo recomendamos, pues su presencia agrega propiedades oxigenantes al biodiesel y mejora la combustión.

El glicerol que se extrae del aceite puede venderse tal cual, transformarse en otros productos de mayor valor agregado (por ejemplo jabón de glicerina, jabón líquido, aceite soluble para corte de metales, fungicidas, etc), o ser procesado para obtener un producto de mayor pureza que pueda ser tipificado (glicerina).

El BIODIESEL reduce la contaminación. Las emisiones netas de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y de dióxido sulfuroso (SO<sub>2</sub>) se reducen un 100 %. La emisión de hollín se reduce un 40-60%, y las de hidrocarburos (HC) un 10-50 %. La emisión de monóxido de carbono (CO) se reduce un 10-50%. Se reduce igualmente la emisión de hidrocarburos policíclicos aromáticos (PAHs), y en particular de los siguientes derivados, de comprobada acción cancerígena: Fenantrén - 97%; Benzoflúorantren - 56%; Benzopirenos - 71%. Finalmente, la emisión de compuestos aromáticos y aldehídos se reduce un 13%, y las de óxidos nitrosos (NO<sub>x</sub>) se reducen, o aumentan, 5-10% de acuerdo con el desgaste del motor, y la calibración de la bomba de inyección.

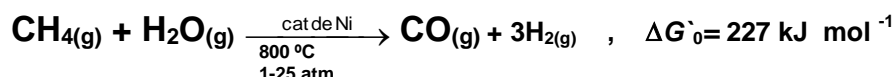
### **2.3.1.2 Metanol**



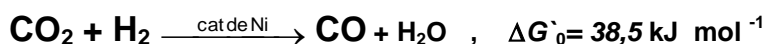
Hasta 1925 el metanol se producía industrialmente por destilación destructiva de madera, sintetizándose desde entonces en su mayor parte a partir de CO y H<sub>2</sub>, según la ecuación:



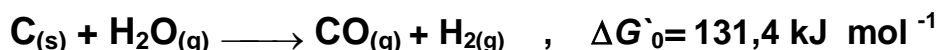
El proceso, originalmente, operaba a 300 atm y 200 °C. En 1968 se desarrolló un método de baja presión (50 atm y 250 °C) que utiliza un catalizador altamente selectivo. La producción de metanol, en 1980, fue de 12 millones de tm, con metano como material de partida y una eficiencia energética de un 60 por 100. La técnica se basa en las siguientes reacciones:



y como la mezcla de gases resultante es muy rica en H<sub>2</sub> al añadir un 33 por 100 de CO<sub>2</sub> se obtiene la razón ideal 1:2 (CO/H<sub>2</sub>), debido a la siguiente transformación:



El metanol se obtiene, finalmente, a partir de la mezcla gaseosa según la primera de estas ecuaciones, consiguiéndose mediante doble destilación metanol al 99,99 por 100 de pureza. El gas natural, que contiene del 65 al 95 por 100 de metano, del 1 al 6 por 100 de etano y entre el 0 y el 25 por 100 de N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> y SH<sub>2</sub>, ha sustituido a la madera, utilizada primitivamente como materia prima para la producción de metanol, ya que a eficiencia en este caso era sólo del 38 por 100. Sin embargo, en áreas de gran producción maderera, la formación de metanol a partir de madera, vía CO y H<sub>2</sub>, es todavía económica y ecológicamente rentable. Para las próximas décadas, el carbón es el candidato más firme para la producción de metanol, ya que puede producir gas de síntesis, según la siguiente ecuación:



El metanol puede fabricarse a partir de biomasa, que produce el gas de síntesis directamente, por pirolisis o gasificación, o bien indirectamente, a través de la producción de biogás por digestión anaeróbica. La posibilidad más económica (10 dólares/MJ) consiste en la síntesis del metanol a partir del CO<sub>2</sub> de rocas carbonatadas y el hidrógeno del agua producido por electrolisis mediante energía solar o nuclear.

#### a) Metanol como combustible

La utilización de metanol como combustible significa una conversión y almacenamiento de energía solar cuando se usa biomasa como materia prima para su síntesis. El metanol puede ser transportado y almacenado tan fácilmente como la gasolina, y es más barato y menos peligroso que el gas natural, ya que éste hay que licuarlo. Es previsible que el metanol juegue en el futuro un papel básico, no sólo como combustible, sino también como materia prima en la industria petroquímica. Entre sus posibles usos están: fuente de energía para la industria (42 por 100), materia prima para la industria química (25 por 100), carburante (21 por 100), producción de biomasa de calidad (4 por 100), otros usos industriales (8 por 100). Además, la gasolina se puede mezclar con un 15 por 100 de metanol, utilizándose esta mezcla como carburante de vehículos sin necesidad de cambios o adaptaciones mecánicas en los motores.

### **2.3.2 Cascarilla de arroz**

En el aspecto *comercial*, el nuevo horno abrió un espacio importante en el mercado de equipos para generación de calor y secado de granos, puesto que, hasta ahora, no existían hornos quemadores de cascarilla de arroz para instalaciones de gran capacidad de proceso.

Desde el punto de vista *socioeconómico*, se llenaron las expectativas de generar un importante aporte a la utilización de un desecho con el propósito de economizar combustible en los sectores agroindustriales colombianos y latinoamericanos de la molienda de arroz, logrando reducir significativamente los gastos de almacenamiento y manejo de la cascarilla de arroz en dichas instalaciones.

En relación con lo *ecológico*, se contribuye, en gran medida, a la reducción de un desecho de difícil biodegradación como lo es la cascarilla del arroz. Asimismo, en estos tiempos de crisis energética mundial, se ha logrado encontrar una fuente alternativa de generación de calor y así reducir el consumo de combustibles fósiles como el diesel, carbón y gas natural.

Con miras a la utilización de tecnologías sustentables en plantas de la agroindustria, la utilización de la cascarilla de arroz representa un aporte significativo en la preservación de los recursos naturales para garantizar un futuro mejor para las nuevas generaciones.

Desde el punto de vista investigativo este proyecto ha representado un gran impulso al desarrollo de la cultura de investigación y un nivel aceptable de capacitación en metodologías de investigación aplicada, lo que permitió la creación y desempeño del Departamento de Investigación y Desarrollo. Actualmente, la compañía exporta el 60% de la producción a países de América Central y del Caribe, con el consiguiente impacto en el valor de la producción y en el empleo que genera. Otros productos están en fase de prueba, a nivel de prototipo.

#### **2.3.2.1 Propiedades de la cascarilla de arroz**

La cascarilla de arroz que se produce en el Tolima (Colombia) presenta la siguiente composición química obtenida de un estudio hecho por Unión de Arroceros S.A.

Composición química de la cascarilla de arroz producida en el Departamento del Tolima.

**COMPONENTE %**

Carbono	39.1
Hidrógeno	5.2
Nitrógeno	0.25
Oxígeno	37.2
Azufres	0.43

**Cenizas**

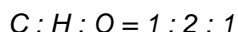
(Sílice 94.5%)	17.8
Humedad (H <sub>2</sub> O)	8.9

Como se puede ver, existen compuestos en una proporción ínfima como el nitrógeno y los sulfuros, y otros que son inertes en la reacción química de la combustión como las cenizas. Así que sólo se tendrán en cuenta el carbono, el hidrogeno y el oxígeno para obtener la formula química equivalente de la cascarilla de arroz, cuyos porcentajes se dividen por el peso molecular de cada uno para hallar su cantidad molar:

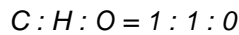
**COMPONENTE MOL**

Carbono	3.2553
Hidrógeno	5.1592
Oxígeno	2.3251

Luego, se dividen estas cantidades por la menor de ellas, en este caso el oxígeno, para obtener la relación atómica que guardan los elementos entre sí, la cual reducida a cantidades enteras por razones estequiométricas llega a ser:



Estos valores corresponden al carbono equivalente, al hidrógeno equivalente y al oxígeno equivalente. Sin embargo, en la estequiometría de la combustión el oxígeno equivalente debe ser sustraído del hidrógeno equivalente, y el hidrógeno restante se denomina hidrógeno neto. Entonces, el carbono equivalente y el hidrógeno neto es la cantidad de carbono e hidrógeno disponible para la combustión. Por lo tanto, la relación atómica quedaría:



y la fórmula empírica equivalente de la cascarilla de arroz será  $C1H1$ , aunque por comodidad se referirá en este artículo simplemente como  $CH$ .

No obstante, se debe hacer claridad en el hecho de que ésta no es la fórmula molecular de la cascarilla de arroz sino sólo un estimativo teórico de la misma. Se recurre a este equivalente ya que no se dispone del peso molecular de la cascarilla de arroz que permitiría calcular la fórmula molecular. Esto debido a que la cascarilla de arroz no es propiamente un compuesto químico sino un aglomerado de muchos compuestos. A partir de esta fórmula se puede hacer un estudio cuantitativo y cualitativo de la reacción de la combustión de la cascarilla de arroz.

Según el estudio realizado por la compañía Unión de Arroceros S.A., el poder calorífico de la cascarilla de arroz producida en el departamento del Tolima es de 15223.484 kJ/kg. No obstante, para calcular la temperatura adiabática de llama se necesita convertir este valor en función de la cantidad molar debido a que se está trabajando con reacciones químicas basadas en dicha variable.

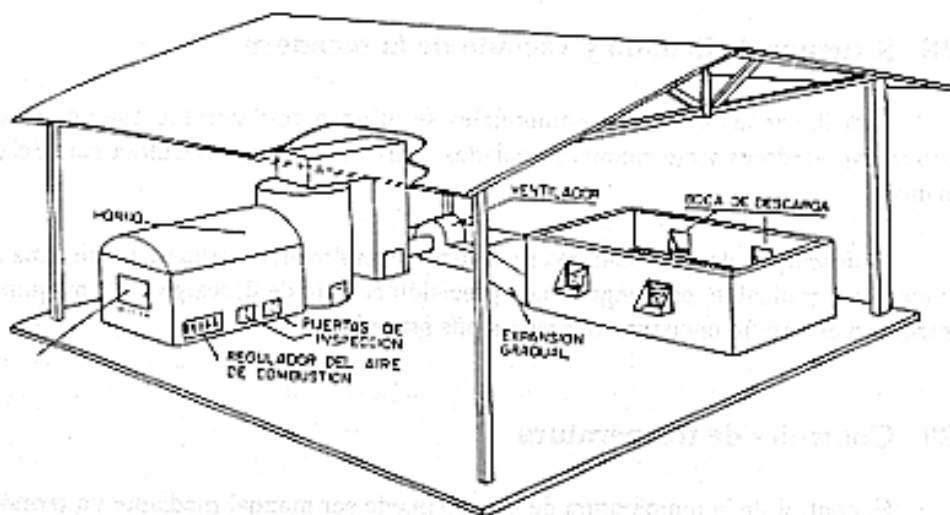
Utilizando la primera ley de la termodinámica para volumen constante se define la temperatura adiabática de llama para el proceso de combustión que se lleva a cabo en el interior de un quemador de cascarilla de arroz.

También la afecta la disociación aunque en menor medida pues no alcanza temperaturas tan elevadas como los combustibles convencionales, lo que, en cierta medida, es favorable debido a la facilidad que esto representa en el control de la presencia de compuestos  $NO_x$  en los productos de la combustión. Por otra parte, debido a que la cascarilla contiene muy bajos niveles de azufre también se obtendrán bajos niveles de compuestos  $SO_x$  en los productos de la combustión. Estos dos hechos repercuten en menores controles al proceso de combustión, lo único por lo que se deben preocupar es por regular la mezcla debido a la posible aparición del  $CO$  y del  $NO$  y por ejercer un cuidadoso control del material particulado que es fácilmente conseguido por medio de filtros y ciclones. La más importante recomendación es permanecer, en la medida de lo posible, en la mezcla estequiométrica aire-combustible para controlar los problemas de emisiones contaminantes a la atmósfera. Por lo que se recomienda realizar la combustión con una mezcla de relación de equivalencia entre 0.9 y 1.1, aunque lo ideal para que no aparezcan especies no deseables como  $CO$  y  $NO$  es obtener una mezcla con un valor de relación de equivalencia de 1,1.

### **2.3.2.2 Utilización como combustible**

La cascarilla de arroz es sin duda el combustible más barato para el secado, en molinos y factorías arroceras. Existen muchos diseños diferentes, pero sus características esenciales son las mismas.

El horno de cascarilla está construido en ladrillos refractarios y de barro corriente, formando tres cámaras internas: la primera es el hogar donde se quema la cascarilla, y las otras dos son para decantación de las cenizas y partículas livianas. Este es, por lo tanto, un sistema de calentamiento directo, en el que una parte de las cenizas va con el aire de secado hasta el recipiente o secadora, donde se encuentran los granos por secar.



**Figura 2.11** Esquema de horno para cascarilla (tamo) de arroz

La parrilla del hogar está formada por varillas o angulares de hierro, inclinada a 45°, para que el aire pase a través de la cascarilla en combustión. El flujo de aire se logra por la aspiración del ventilador de la secadora.

Existe una mezcla de aire caliente con aire ambiental, mediante compuertas situadas en las paredes del horno. Además, el ventilador de la secadora aspira aire fresco, para mantener la temperatura de secado dentro de límites aceptables. Sin embargo, el control de la temperatura no es fácil de obtener, por ser todos los controles manuales.

En general, el operario adiciona más o menos cascarilla al horno para que la temperatura fluctúe entre límites establecidos.

### **2.3.2.3 Conformación de Briquetas de cascarilla de arroz con aserrín.**

Las briquetas son un biocombustible (de origen lignocelulósico en la mayor parte de los casos) formado por la compactación de biomasa (lignocelulósica en la mayor parte de los casos). En el proceso de briquetado puede haber transformaciones químicas debido al calentamiento de la biomasa en el interior de la briquetadora. La materia prima fundamental serán las astillas y residuos de madera, sin embargo, a veces, las briquetas están formadas por la compactación de cualquier tipo de biomasa residual. El término «briqueta» (briquette en inglés) es un término claro por un lado y confuso a la vez. Es claro, ya que una vez vista una briqueta no se puede confundir con otro biocombustible. Pero es confuso porque la briqueta puede estar fabricada con muy diversos materiales compactados.

La característica común de todas las briquetas es su alta densidad. Su forma suele ser cilíndrica; pero no lo es así siempre. Por ejemplo, las briquetas de carbón vegetal que se obtienen compactando polvo o carbón granulado tienen forma de «huevo» o de avellana de unos 12-20 cm de largo, Cada proceso y fabricante produce una briqueta de forma y dimensiones distintas.

La forma de las briquetas es muy variada, como veremos más adelante. Abundan las briquetas de forma cilíndrica, con diámetros entre los 3 y 20 cm y longitudes entre los 15 y 50 cm. Otras formas usuales son las de prisma cuadrado o prisma hexagonal hueco. En otros casos las briquetas tienen forma de ladrillo. Las briquetas de carbón vegetal, hechas con carbonilla y polvo de carbón al que se ha añadido harina y se ha humedecido ligeramente para su compactación.

La briqueta se vende a granel o en bolsas de 10 kg a 20 kg. También se vende en cajas de 11 - 15 kg

Las briquetas se han desarrollado por cuatro motivos:

1. Para revalorizar un conjunto de residuos sólidos orgánicos que producían calor en su combustión. Entre estos residuos sólidos orgánicos se incluyen:
  - Residuos de industrias forestales de primera transformación (aserraderos, cajoneras y otras) o de segunda transformación (fábricas de puertas, ventanas, muebles, ect).
  - Residuos de industrias agrícolas y/o ganaderas.
  - Residuos sólidos urbanos (RSU) entre los que se incluyen residuos de muebles, tableros, palets, embalajes.
  - Residuos sólidos de aprovechamientos agrícolas y forestales.

- 2 Para aumentar la densidad de ciertos biocombustibles que eran muy caros de transportar debido a los bajos valores de la misma.
- 3 Para sustituir combustibles sólidos fósiles.
- 4 Para eliminar residuos sólidos de tipos muy variables.

## **2.4 Cámara de combustión**

Antiguamente las secadoras tenían hornos con ladrillos refractarios, los cuales adquirirían una elevada temperatura y permitían, entonces, una muy buena pulverización del combustible y por ende una correcta mezcla con el aire, que llevaba en definitiva a una excelente combustión. Por lo tanto, no se necesitaba una alta presión del combustible. Sólo hacía falta un tiempo extra para calentar el horno.

Hoy en día los hornos han sido reemplazados por cámaras de combustión metálicas, las cuales se calientan menos, debiendo por lo tanto, usarse alta presión de aire y de combustible. Todo ello obliga a controlar el buen funcionamiento de las bombas de presión.

Una buena llama del quemador tiene un color amarillento-anaranjado, lo que representa un funcionamiento correcto (para combustibles tipo gasoil). Si se observan llamaradas rojas y lenguas de humo se deduce que la combustión tiene un exceso de combustible, por trabajar con la válvula de combustible demasiado abierta y no es posible regular la combustión porque la entrada de aire ya está abierta al máximo.

La temperatura de una llama se encuentra en torno a los 2 000°C, mientras que los gases de esa combustión están entre 800 y 1 000°C. Como sabemos la transmisión de este calor al aire de secado se hace por simple dilución (combustión directa) o por intermedio de un intercambiador (combustión indirecta).

Muchos quemadores son del tipo de dos fases o de dos llamas, en los cuales la segunda llama entra en funcionamiento mediante la intervención de un termostato cuando la primera es insuficiente para mantener una temperatura prefijada de aire caliente.

### **2.4.1 Concepto de combustión**

Para quemar completamente 1 kg de gasoil se requiere un mínimo de 15 kg de aire, o sea unos 12 m<sup>3</sup>. Como en un quemador no se puede mezclar bien el aire con el combustible, es necesario aumentar la cantidad de aire. Esto aumenta el volumen de gases de la combustión, los cuales, por estar a una temperatura determinada, aumentan las pérdidas de calor, proporcionales al exceso de aire.

Para medir el exceso de aire, se debe obtener una muestra de los gases y medir en ellos el contenido de anhídrido carbónico (CO<sub>2</sub>). En una combustión perfecta el contenido de CO<sub>2</sub> debe ser el 15,2% en volumen. El exceso de aire será por tanto más elevado cuando el porcentaje de CO<sub>2</sub> es menor. En ensayos en Francia el contenido en CO<sub>2</sub> oscila entre 7 y 12%. Existen dispositivos simples para medir el contenido de CO<sub>2</sub> con una buena aproximación, que se basan en la absorción de este gas en una solución alcalina de potasio.

En el Tabla 2.9 están indicados los diferentes porcentajes de exceso de aire en la combustión.

Por otro lado, si la cantidad de aire (o sea el oxígeno) es insuficiente, una parte del carbono será parcialmente quemado, lo que se traducirá en la formación de hollín. Entonces, existe la tendencia a aumentar la cantidad de aire al quemador para asegurar una combustión lo más completa posible, con las consecuencias explicadas. Un exceso de aire produce, en general, una llama de color amarillo claro.

Hay entonces un equilibrio a encontrar entre la ausencia de partículas carbonosas y un exceso de aire.

La presencia de hollín se puede comprobar haciendo pasar una cierta cantidad de los gases de la combustión, extraídos por una bomba, a través de un filtro de papel; se compara luego la coloración obtenida con una escala testigo (escala Baccara). La coloración no debería superar el índice 1 de la escala Baccara para el gasoil, y el índice 2 para el fueloil.

Esto es fácil hacerlo en las secadoras que tienen intercambiador de calor, en las cuales se aconseja que se lleve a cabo cada 2 a 3 días, midiendo la ausencia de hollín y el contenido de CO<sub>2</sub>.

**Tabla 2.9.** Exceso de aire, en porcentaje

<b>Contenido de CO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub>, en volumen</b>	<b>Gas - oil %</b>	<b>Diesel - oil %</b>
15,9	-	0
15,2	0	4
14,5	4	9
14,0	8	13
13,0	16	21



12,0	24	30
11,0	36	41
10,0	48	54
9,0	66	73
8,0	83	91
7,0	112	120

También se aconseja que estas mediciones se efectúen en forma imperativa cada vez que se modifican las dimensiones del gliceur. El tenor de CO<sub>2</sub> que debiera conseguirse no debiera ser menor de 12%.

Las secadoras con intercambiador permiten medir la temperatura de los gases de la combustión, la que, como promedio, oscila entre 150 y 200°C a la salida de la chimenea. Si esta aumenta, significa suciedad en forma de capa en el intercambiador. Se considera que una subida de 20°C en esa temperatura, comparada con la misma cuando el intercambiador estaba limpio, es un índice de suciedad.

Conocida la temperatura de los gases de la combustión y el % de CO<sub>2</sub>, se pueden calcular las pérdidas debidas a dichos gases por esta fórmula:

$$\frac{T_g - T_a}{\% \text{ CO}_2} \times 0,56$$

Donde:

T<sub>g</sub>: temperatura de los gases

T<sub>a</sub>: temperatura del aire ambiente

% CO<sub>2</sub>: contenido de CO<sub>2</sub> en los gases

Estas pérdidas no debieran ser superiores al 12%. Si lo fueran significaría que el intercambiador está mal diseñado, o que está muy sucio por depósitos de hollín.

En las secadoras sin intercambiador posible tolerar tenores de CO<sub>2</sub> algo menores, pues ello representa un exceso de aire que favorece una buena combustión. En estas secadoras, estas mediciones son dificultosas, pues se deben efectuar entre la cámara de combustión y el arresta-llamas, antes de que los gases se mezclen con el aire de secado.

En las secadoras que tienen chimenea de evacuación de gases de combustión se puede taladrar un agujero para extraer las muestras. J.L. Poichotte, técnico investigador francés recomienda utilizar un deshollinador químico el cual, pulverizado en la llama, desintegra las partículas de hollín para evitar que se depositen en las paredes; este tratamiento debiera realizarse cada vez que la temperatura de los gases aumente 20°C con respecto al valor que ha sido medido inmediatamente después de un deshollinado.

## **CAPITULO 3**

### **SECADORES CONVENCIONALES DE GRANOS**

#### **3.1 Secadores Continuos**

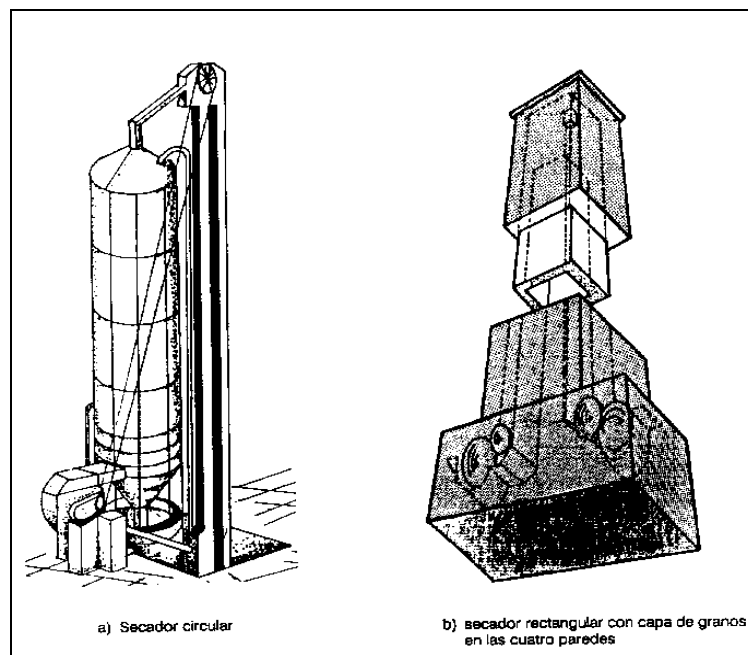
##### **3.1.1 Secador de columna (flujo cruzado)**

El secador de flujos cruzados es el que más se usa en el mundo, gracias a su popularidad en los Estados Unidos. Dicha popularidad se deriva de los principios simples de su construcción y funcionamiento, junto con el costo inicial más moderado, en comparación con otros tipos de secadores.

Los secadores de flujos cruzados se caracterizan por el paso del aire perpendicular a una capa de granos, que se mueven entre planchas perforadas. Esos secadores pueden tener diversas configuraciones y la forma comercial más común es el secador de tipo torre fijado a una base. La torre puede ser circular, con la capa de granos rodeando el quemador y el ventilador, o bien rectangular, con columnas de granos en dos o en los cuatro costados. En la figura 3.1 se presentan esquemas de estos tipos de secadores

El secador del tipo de torre rectangular también puede presentar varias columnas dispuestas unas al lado de otras. En la figura 3.2 se presenta otro esquema de secador de flujos cruzados, junto con el tipo de torre rectangular de varias columnas.

Algunos secadores de flujos cruzados son de construcción horizontal, con las columnas de granos colocadas a los dos lados de la cámara de distribución de aire.



**Figura 3.1** Esquemas de secadores de flujos cruzados de tipo torre.

Se les puede usar como secadores de etapas múltiples, o como secadores continuos. Los secadores de flujos cruzados horizontales se pueden montar unos sobre otros, cuando se quiere secar una mayor cantidad de granos. Los módulos pueden funcionar a la misma temperatura o a temperaturas diferentes. Algunos módulos intermedios pueden servir de zonas de reposo, para lo cual basta con desconectar la fuente de movimiento del aire.

El módulo de base se usa, generalmente, como enfriador. Se ve un esquema de este tipo de secador, en la figura 3.3

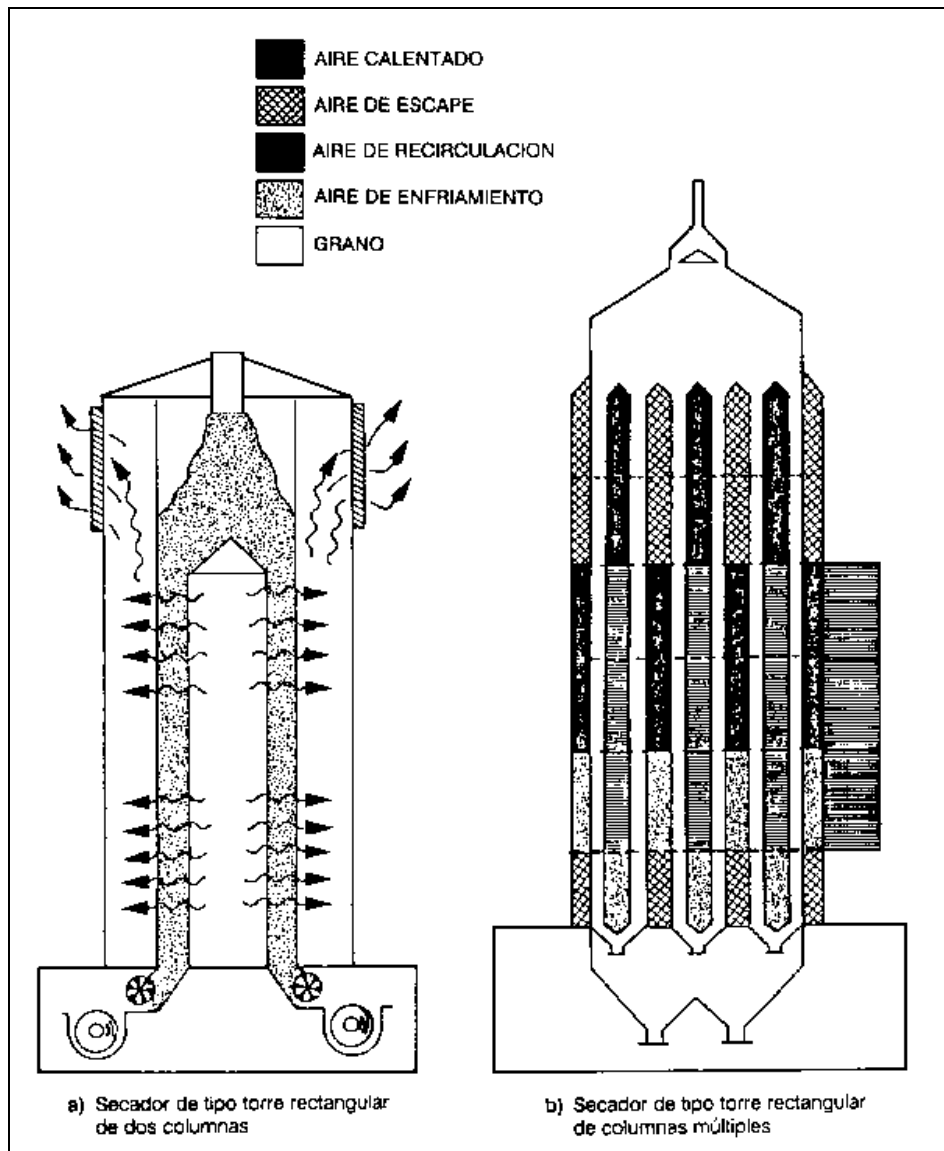
En el secador de flujos cruzados convencional, aire y granos se mueven en direcciones perpendiculares. Los granos próximos a la entrada de aire tienden a resecarse y recalentarse; los que quedan cerca de la salida, en la columna, tienden a quedar húmedos. La diferencia de humedad a través de una columna de 0,30 m. puede alcanzar puntos porcentuales de humedad elevados, dependiendo de los parámetros de secado.

La optimización de desempeño de un secador de flujos cruzados se puede obtener mediante el manejo adecuado de los parámetros del secador: altura, profundidad y espesor o ancho de la columna, flujo de masa, temperatura y velocidad del aire.<sup>11</sup>

La profundidad del secador influye solamente en su capacidad total, siempre que haya simetría, en esa dimensión, en cuanto a la temperatura y humedad de los granos. La altura de la columna y el flujo del producto determinan el tiempo de residencia de los granos dentro del secador.

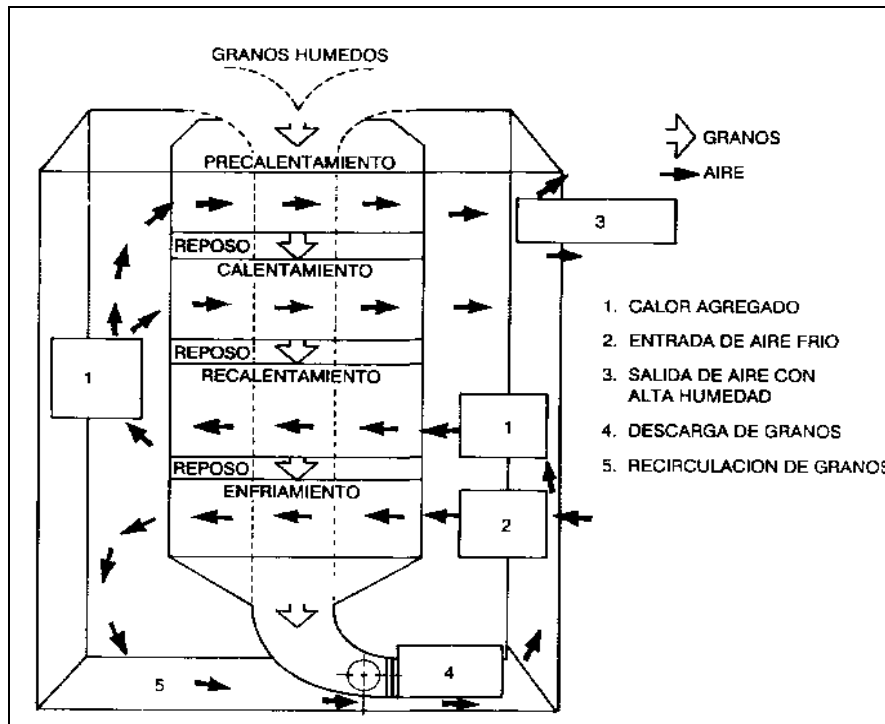
---

<sup>11</sup> BAUER et al., 1978.



**Figura 3.2.** Esquema de secadores de flujos cruzados.

Así, en el proceso de optimización del secador de flujos cruzados hay cuatro parámetros principales que investigar: espesor de la columna, tiempo de residencia, flujo de aire y temperatura de secado.



**Figura 3.3** Esquema de un secador de flujos cruzados

Se han hecho algunas tentativas de reducir las diferencias de temperatura y humedad, pero sin influir significativamente en la capacidad y eficiencia del secador. Se investigaron, inicialmente, los efectos de invertir el sentido del flujo de aire en la mitad de la zona de secado. Aun cuando este cambio en el secador convencional dio como resultado una leve disminución en la eficiencia y capacidad del secador, se observó una reducción del 60 a 75 por ciento en la diferencia de humedad a través de la columna.<sup>12</sup>

La recirculación de parte del aire del escape es un adelanto en los secadores de flujos cruzados. Generalmente se recircula cerca del 50 por ciento del aire total, en el secado de maíz. Por recirculación se entiende la reutilización total o parcial del aire de escape en el secado, pasándolo o no por una fuente de calentamiento. En los secadores que funcionan con esta técnica, el aire saturado proveniente de la primera etapa de secado sale al ambiente.

<sup>12</sup> (CONVERSE, 1972; LEREW, et al., 1982; PAULSEN y THOMPSON, 1973; MOREY y CLOUD, 1973).

El aire que sale de las etapas siguientes de secado se mezcla con el aire que pasa por la zona de enfriamiento y se dirige a la fuente de calentamiento, para usarse nuevamente.

En la figura 3.4 se presenta un esquema de secador de flujos cruzados modificado, con inversión del flujo de aire y recirculación de parte del aire de escape. El principal beneficio de la recirculación de una parte del aire está en el aumento de la eficiencia térmica del secado. Así, pues, se ha observado en un secador modificado, una reducción del 50 por ciento en el consumo de energía por unidad de agua evaporada.<sup>13</sup> Otras investigaciones señalaron una economía del orden de 30 a 42 por ciento, cuando recircula cerca del 50 por ciento del aire de escape.<sup>14</sup>

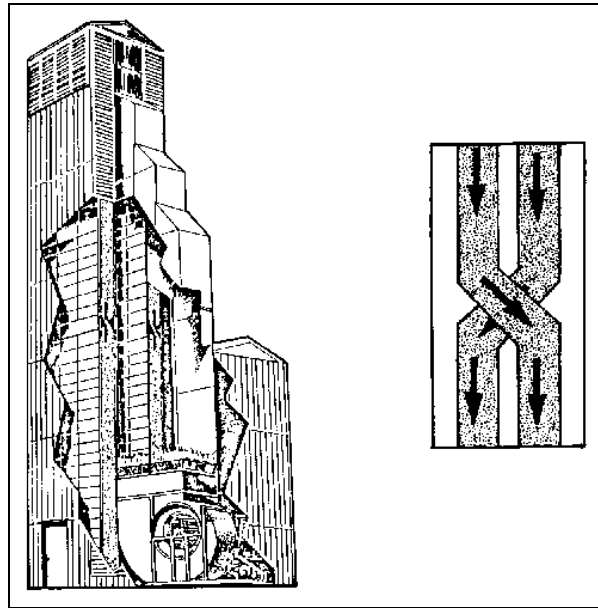
La inversión de sentido del flujo de aire no es posible en ciertos secadores de flujos cruzados, porque las columnas de granos están situadas alrededor de la fuente de calor.

En tales secadores se hace uso de un dispositivo que alterna la posición de los granos respecto del aire de secado; los granos más húmedos pasan hacia el interior del secador y los más secos pasan a la parte externa. En la figura 3.5 se presenta un esquema de este dispositivo.

---

<sup>13</sup> LEREW et al., 1972

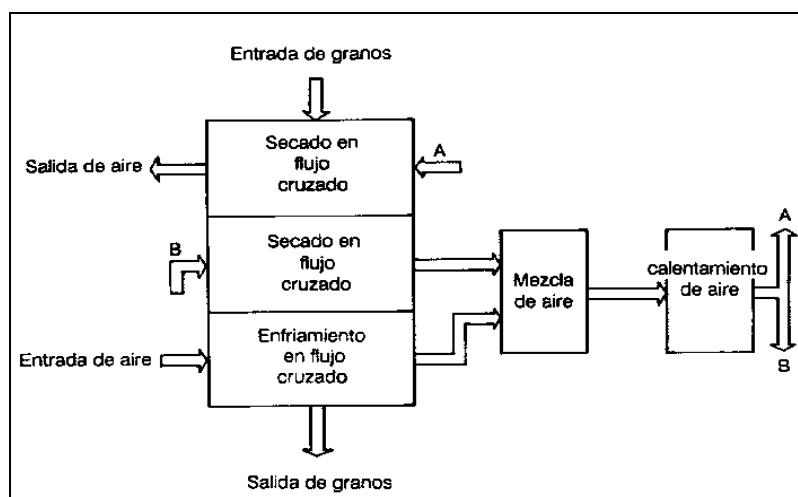
<sup>14</sup> BAKKERARKEMA et al., 1972 y 1979; BAUER et al., 1977



**Figura 3.4.** Diagrama de un secador de flujos cruzados

La utilización de zonas de reposo es recomendable en los secadores de flujos cruzados. En esas etapas, la humedad se redistribuye al interior de los granos, lo que facilita su evaporación en la etapa de secado siguiente.

Con la introducción de zonas de reposo en un secador de flujos cruzados para secar soya, de 20,5 a 12,1%, se previó una reducción de alrededor de 40 por ciento en el consumo de energía específica.<sup>15</sup>

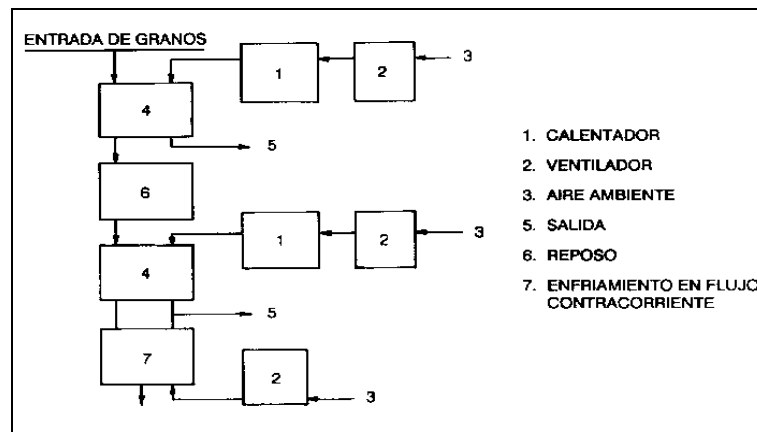


**Figura 3.5** Esquema del dispositivo para alternar la posición de los granos

<sup>15</sup> (DALPASQUAL E, 1981).



Aun así, los efectos del uso de zonas de descanso en los secadores de flujos cruzados no se conocen del todo, por lo que deberán ser objeto de investigaciones futuras. Un esquema de secador de flujos cruzados, con inversión del sentido del flujo de aire de escape y etapas de descanso, aparece en la figura 3.6



**Figura 3.6** Diagrama de un secador de flujos cruzados con inversión y recirculación

### 3.1.2 Secador de caballete (flujo mixto)

Una de las dificultades que suelen observarse en ciertas secadoras de caballetes es el pasaje o escurrimiento hacia abajo de los granos en forma no uniforme o despareja, situación que significa que habrá granos que descenderán a diferente velocidad, los más rápidos se secarán incompletamente y los más lentos pueden sobre secarse. La causa de este defecto se debe a la forma y disposición de los caballetes, es decir, a un diseño inadecuado de los mismos.

Una distribución particular de los caballetes, en los que ha podido medirse que las capas de grano 1 y 5 tienen UD descenso lento, mientras que las capas 2, 3 y 4 tienen un descenso rápido. En los ensayos realizados en la Estación Experimental de Boigneville, del ITCF (ITCF, 1989) encaminados a resolver estos problemas, se ha logrado obtener diseños más satisfactorios, no sólo en la forma de los caballetes sino en su disposición.

Se han recomendado los caballetes con un ángulo superior de 50° y con los rebordes inferiores hacia adentro. Además dichos estudios aconsejan sustituir la configuración clásica de una línea de caballetes de aire caliente y una de

caballetes de aire usado, por una combinación en que se hacen cambios a 180° y con zonas neutras y de templado homogeneizado.

Algunas marcas de secadoras han incorporado en la cámara de secado caballetes de ancho variable (de mayor a menor) para el ingreso de aire caliente, con el fin de asegurar una velocidad constante del aire a lo largo de todo el caballete, y conseguir así una distribución más pareja del aire.

Otra disposición que se ha incluido en algunas secadoras es la posición cruzada de los caballetes. Según sus constructores este diseño separa la masa de granos en capas más delgadas que permiten una mejor mezcla del grano y un contacto más íntimo con el aire, condiciones que originan una máxima uniformidad de secado. También se asegura que esta distribución de caballetes aumenta la rigidez estructural de la torre de granos.

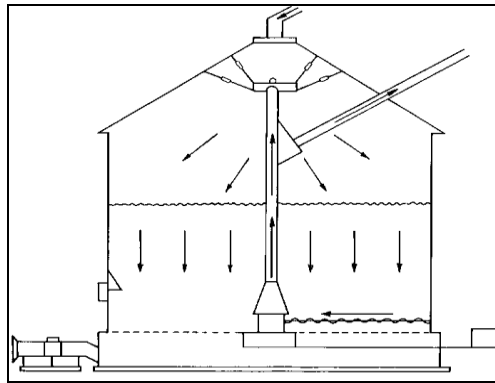
Pero esta distribución, al tener los caballetes del aire usado dos salidas, una para cada lado, reduce la presión del aire, de tal forma que se puede eliminar en gran proporción el peligro de arrastrar granos hacia el exterior, que es un problema en las secadoras de caballetes. Los caballetes superiores, los más cercanos a la carga de muchas máquinas, suelen tener un mayor desgaste debido al fuerte rozamiento de los granos. En este caso suelen ser reforzados con chapa de mayor espesor o por UD metal más resistente.

### **3.1.3 Secador de pantalla o contracorriente**

Los principios del secado en flujos contracorrientes se emplean en la industria para dimensionar los enfriadores de los secadores de flujos contrarios. El enfriador de flujos contracorrientes se usa en los secadores paralelos, porque el método evita los choques térmicos indeseables en los granos, puesto que la diferencia de temperatura entre el aire y el producto permanece prácticamente constante en toda la cámara de enfriamiento.

El secado en silos se puede considerar secado en flujos contrarios, cuando se utiliza un tornillo sin fin que gira lentamente sobre el fondo perforado y retira los granos parcialmente secos, los que pasan a otro silo. La zona de secado

permanece prácticamente estacionaria y próxima a la entrada del aire de secado en la masa de granos. El enfriamiento posterior de los granos se efectúa en otro silo, donde se termina el secado. En la figura 3.7, hay un esquema de dicho sistema de secado.



**Figura 3.7** Secado en flujos contrarios, en silos.

El secado de granos en silos provistos de este tipo de mecanismo representa un adelanto y presenta las siguientes características:

- a) No hay pérdida de energía en el secado de granos con humedad inferior a la deseada, puesto que no se permite que el producto llegue a la humedad de equilibrio;
- b) Los granos están sujetos a temperaturas elevadas mientras pierden humedad a una tasa razonable. Con esto se evita que el producto alcance la temperatura del aire de secado. Comparado con el sistema de secado en partidas, en silos, el tiempo de exposición de los granos a las condiciones del aire de secado es menor; y
- c) Como el producto no se reseca, los daños mecánicos debidos al transporte posterior se reducen.

Dicho sistema de secado en flujos contrarios presenta ciertos problemas, entre ellos la carga adicional que deben soportar las paredes del silo debido a los equipos que mueven los granos.

## 3.2 Secadores Discontinuos

### 3.2.1 Estático

Consta de un cilindro central en el que se le inyecta aire. Este está rodeado por la masa de cereal y el aire la atraviesa, en distintas direcciones siempre del centro hacia fuera.

Se carga con grano húmedo, se trabaja primero con aire caliente y luego frío. Una vez secado el grano recién se procede a la descarga.

### 3.2.2 Recirculado

El trabajo es similar al anterior, pero el grano en su interior se encuentra en movimiento, con este sistema se logra mayor uniformidad que con el anterior. Son máquinas lentas y de baja velocidad de secado.

## 3.3 Secadores Estacionarios

### 3.3.1 Secador de Lecho fijo

Los secadores de lecho fijo se componen de cuatro elementos principales que se observan en la figura 3.8, el sistema de calentamiento del aire, ventilador, cámara de distribución del aire o "plenum", y cámara de secado.

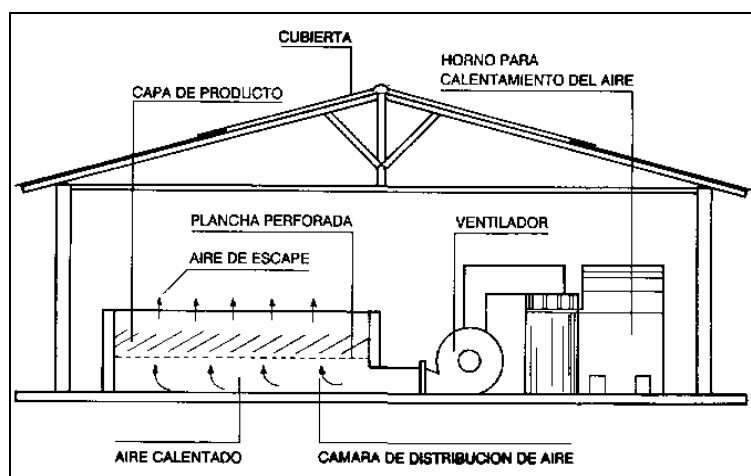


Figura 3.8 Secador de lecho fijo.

El sistema de calentamiento puede ser de cualquier tipo, siempre que esté dimensionado para aumentar la temperatura del aire hasta los límites recomendados para cada producto y que no sea contaminado por el aire que proviene de la fuente de calor. El ventilador, generalmente, es del tipo centrífugo, por la presión estática que se necesita en este sistema. La cámara de distribución de aire sirve para transformar la presión dinámica del aire en presión estática, uniformando la distribución del aire dentro del secador. La cámara de secado es un recipiente con fondo de plancha de metal perforado, capaz de soportar el peso del producto húmedo. El producto permanece estático en la cámara de secado, mientras que el aire caliente, impulsado mecánicamente por el ventilador, pasa a través de la capa de producto y reduce su contenido de humedad. Los secadores de capa fija, en la mayoría de los casos se proyectan para secar solamente una partida por día. Después del secado, el producto se enfría dentro del mismo secador, para lo cual se interrumpe el suministro de energía al sistema de calentamiento y se deja conectado el ventilador.

Las principales variables del sistema de secado de partidas en lecho estacionario son: espesor del lecho, contenido de humedad inicial, flujo de aire, temperatura del aire y tiempo de secado.

El espesor del lecho, generalmente, debe estar entre 0,4 a 0,6 m cuando se trata de granos. Los productos con alto contenido de humedad, como son los tubérculos cortados en formas apropiadas para el secado, no se deben colocar en capas de más de 0,4 m de espesor, por la dificultad para moverlos. Las capas finas, lo mismo que el movimiento manual o mecánico del producto, sirven para prevenir el secado excesivo cerca de la entrada de aire y disminuir las diferencias de temperatura y de humedad dentro del secador.

Si el espesor del lecho fuera mayor, la diferencia entre la humedad del producto junto a la plancha perforada y la humedad del producto que está situado en la parte superior será muy grande (más de cinco puntos porcentuales de humedad), y puede ocasionar serios riesgos al producto durante el almacenamiento, en especial si la bodega no tiene sistema de ventilación. Por tanto, para disminuir las diferencias de humedad, principalmente en lechos de mayor espesor y con temperaturas del aire más elevadas, es preciso revolver el producto a intervalos determinados.

La temperatura de secado afecta directamente la tasa de secado. Cuanto mayor sea la temperatura, mayor será la tasa de evaporación y la irregularidad del contenido final de humedad, si el producto no se revuelve. Con el aumento de la temperatura, la cantidad de granos supersecos no varía mucho, pero la cantidad de granos con alto contenido de humedad es superior. El flujo de aire influye, principalmente, en la tasa de secado y en la distribución de la humedad, en relación con la profundidad de la capa de producto. Al aumentar el flujo de aire, aumenta la tasa de secado y disminuyen las irregularidades de humedad y temperatura en la capa de producto. El flujo de aire que normalmente se emplea en el secado de productos agrícolas en lecho fijo varía de 0,12 a 0,25 [m<sup>3</sup>/s.m<sup>2</sup>]. El tiempo de secado disminuye con el aumento del flujo de aire, pero la eficiencia del secado también disminuye; en condiciones fijas de temperatura, espesor del lecho y flujo de aire, depende también de la humedad inicial y final del producto. Cuanto mayor sea el contenido inicial de humedad o menor sea el contenido final de humedad, mayor será el tiempo de secado.

Algunas ventajas del sistema de secado en capas fijas son: la capacidad del secador es variable; su dimensionamiento, construcción y funcionamiento son relativamente simples; la inversión es menor en relación con los secadores comerciales, principalmente porque se puede construir con materiales corrientes que se encuentran en las cercanías de las propiedades rurales; si la cámara de secado fuera un silo con fondo falso, al término de la cosecha puede servir también para almacenamiento

En la Tabla 3.2 aparecen algunas recomendaciones en cuanto a temperaturas, espesores del lecho e intervalos de tiempo para revolver el producto, en el secado en lecho fijo.

**Tabla 3. 1.** Recomendaciones para el secado de productos agrícolas en lecho fijo.

TEMPERATURA MAXIMA DEL AIRE EN CONTACTO CON EL PRODUCTO, DE ACUERDO CON SU USO FINAL				Espesor de la capa de producto (m)	Intervalo de tiempo para revolver el producto(h)	
Productos	Semilla	Comercio	Alimentación animal		Semilla	Comercio
Maní con cáscara	30	35	-	1,2- 1,8	-	-
Arroz con cáscara	40	45	-	0,25- 0,45	2	2
Avena	40	60	80	0,4-0,6		
Café	-	-	-	0,4-0,5	-	2
Cebada	40	40	80	0,4-0,6	-	-
Frijol a granel	40	45	-	0,4- 0,5	-	-
Frijol en rama	40	45	-	0,6- 1,0	-	2
Maíz desgranado	40	55	80	0,4- 0,6	-	2
Maíz en mazorca (sin cáscara)	40	55	80	1,5- 6	-	2
Ralladura de yuca	-	50	60	0,3- 0,4	-	2
Soya	40	50	-	0,25- 0,45	2	2
Sorgo	40	60	-	0,4- 0,6	-	-
Trigo	40	60	80	0,4- 0,6	-	-

Referencia:

#### a. Dimensiones del secador

La capacidad del secador se calcula normalmente para la producción máxima esperada. Al conocer la cantidad de producto que hay que secar diariamente, se dimensiona el secador que se necesita.

Las dimensiones óptimas de funcionamiento del secador de capa fija se pueden determinar matemáticamente, mediante una simulación de secado, si se conocen los datos siguientes: tipo de producto y finalidad de su uso, contenidos de humedad inicial y final, y cantidad de producto que se va a secar. No obstante, en vista de la rotativa complejidad de dichos cálculos, se puede simplificar ese dimensionamiento si se conoce el valor de algunas variables del sistema. Así se consideran conocidos el espesor de la capa (véase la Tabla 2.2) y el flujo de aire (0,12 a 0,25 m<sup>3</sup>/s. m<sup>2</sup>). Luego, conociendo la masa de producto que se va a secar, por partida (mp), el peso

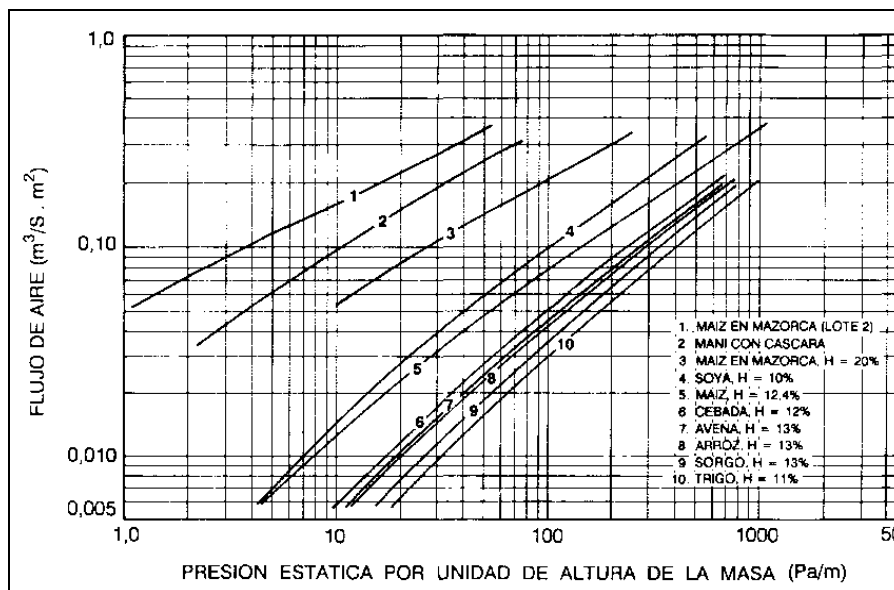
específico global del producto ( $p_p$ ) y el espesor de la capa de producto ( $H$ ), se calcula el área de la cámara de secado ( $A$ ) con la ecuación:

$$A = \frac{m_p}{p_p H}$$

El flujo de aire de secado ( $Q$ ) se puede calcular en función del flujo de aire ( $Q_a$ ), dado en  $m^3/s \cdot m$ , y del área de la cámara de secado:

$$Q = Q_a A$$

La presión estática del ventilador se puede obtener sumando las pérdidas de carga del sistema. Estas pérdidas se producen por la disminución del aire al pasar por los conductos, ampliaciones, camas, válvulas y principalmente, al pasar a través de la capa de producto.



**Figura 3.9.** Resistencia de granos y semillas al paso del aire.

Las pérdidas de carga referentes al sistema de distribución del aire se pueden calcular por mecánica de fluidos. Las pérdidas de carga en virtud del paso del aire entre los granos se pueden obtener con ayuda del gráfico de la figura 3.9, si se conoce el espesor de la capa de producto y el flujo de aire.



Por ejemplo, considerando un flujo de aire igual a  $0,17 \text{ m}^3/\text{s m}^2$ , para el arroz, se tiene una presión estática de  $615,8 \text{ Pa/m}$ . Así, si se conoce la presión estática del sistema y el flujo de aire necesario, se puede calcular la potencia útil que necesita el ventilador. Para calcular la potencia útil del ventilador se acostumbra aumentar el flujo de aire en cerca del 25%, por razones de seguridad.

- a) Estos valores rigen para producto sin compactar, limpio y seco, con granos limpios, sin compactar, con alto contenido de humedad (en equilibrio con humedad relativa superior a 85%), se usa sólo 30% de la pérdida de presión indicada para una tasa dada de flujo de aire.
- b) La compactación del grano en el silo puede causar 50% más de resistencia sobre los valores señalados.
- c) Cuando hay materias extrañas mezcladas con el grano, no hay recomendación específica para correcciones. La resistencia al flujo del aire aumenta si la materia extraña es de menor tamaño que el grano y disminuye si la materia extraña es mayor que el grano.

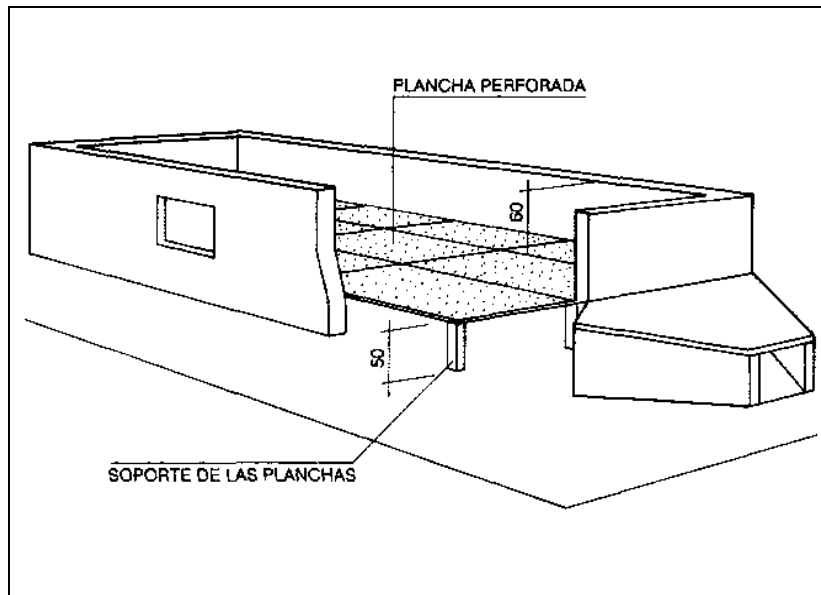
#### **b. Construcción del secador**

El secador de capa fija se debe construir en un lugar cubierto, para que pueda funcionar incluso en condiciones meteorológicas adversas y de noche. Hay que construirlo de tal modo que su manejo sea seguro, para evitar riesgos para el operador o perjuicios a la calidad del producto. Hay que tener cuidado de prevenir incendios, tanto en el secador mismo como en las construcciones vecinas. Las partes móviles del motor y del ventilador deben estar protegidas del contacto con personas o animales. La temperatura del aire de secado se debe controlar mediante un termómetro colocado en la entrada de la cámara de distribución del aire, para evitar que éste se recaliente.

Se pueden emplear diversos materiales en la construcción de conductos y en las cámaras de secado y distribución del aire. Ya existen en el mercado silos metálicos apropiados para funcionar como cámara de secado, con la ventaja de que al final de la cosecha sirven como silos de almacenamiento. Los secadores hechos de madera también son viables, aunque acarrearán riesgos de incendio. En el Brasil parece que una de las opciones más interesantes, del punto de vista económico, es el secador construido de albañilería.

Cabe observar ciertas recomendaciones respecto de los siguientes componentes del sistema:

- a) Cámara de secado y cámara de distribución de aire figura 3.10. La cámara de secado debe tener el piso de plancha metálica perforada, de modo que el área perforada sea por lo menos el 10% del área total, para evitar que haya altos valores de pérdida de carga. La cámara de secado puede ser rectangular o circular. El piso de forma rectangular debe tener una relación de 1,5 entre el lado mayor y el lado menor próximo. El piso de forma circular exige mayor cantidad de planchas para su construcción. Si la velocidad del aire que entra en la cámara de distribución es inferior a 1 m/s, la forma del piso deja de tener importancia para el buen desempeño. Para facilitar el mantenimiento del piso de la cámara de secado y del "plenum", y evitar elevadas pérdidas de carga, se puede utilizar una cámara de distribución de aire con una altura de 0,5 m.



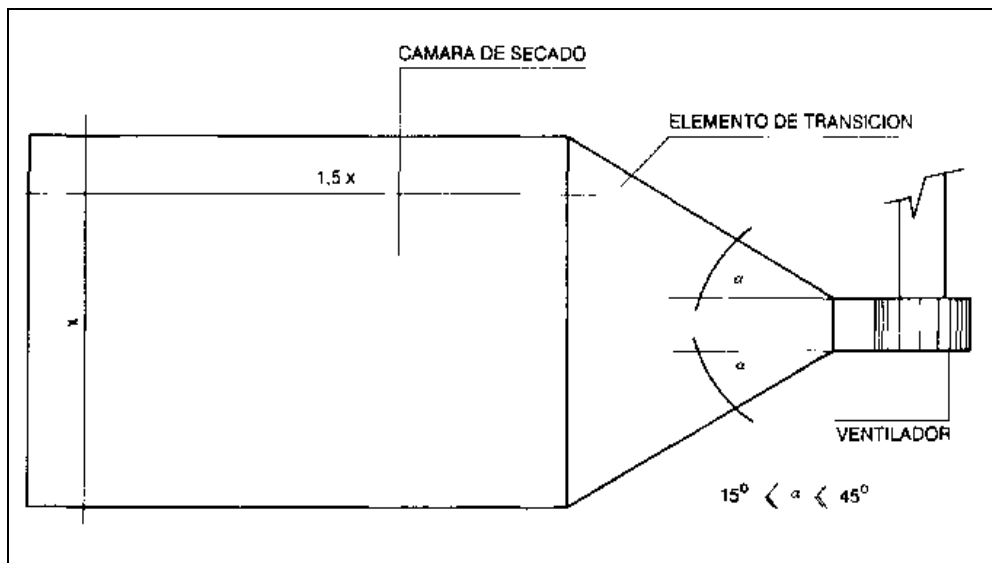
**Figura 3.10** Cámara de secado y cámara de distribución del aire

Los agujeros de las planchas de metal perforadas deben ser tales que no permitan el paso del producto, teniendo en cuenta que interesa más una cantidad elevada de orificios pequeños que pocos orificios de mayor diámetro.

La estructura para soportar las planchas de metal perforadas y la masa del producto pueden ser de distintos materiales, como albañilería y madera, hierro de construcción y perfiles metálicos. La cámara de secado deberá contar con aberturas laterales para la descarga manual o mecánica del producto y un sistema de boquilla para facilitar el ensacado, en caso necesario. La altura total del secador es de 1,2 m. aproximadamente, de los cuales 0,70 m. corresponden a la altura de la cámara de secado y 0,5 m. a la altura del "plenum". Para facilitar la limpieza de la cámara de distribución de aire del secador, se puede construir el piso de la cámara de secado de modo que una de las planchas perforadas se pueda retirar.

*b) Elemento de transición entre la cámara de distribución del aire y el ventilador. El elemento de transición entre la cámara de distribución de aire del secador y el ventilador sirve para uniformar el flujo de aire en el secador. El ángulo de apertura del elemento de transición, en relación con el eje de simetría del secador, debe ser mayor que 15 [°] para que*

la pérdida de carga sea despreciable (figura 3.11). Así, la longitud de la transición dependerá del ángulo y de la disponibilidad de espacio para la construcción del secador<sup>16</sup>. Los conductos de conexión del ventilador con el sistema de calentamiento deben tener dimensiones suficientes para que la velocidad del aire sea inferior a 5 m/s, es decir, 1 m<sup>2</sup> de área de la sección del conducto por cada 5 m<sup>3</sup>/s de aire.



**Figura 3.11** Ángulo de abertura del elemento de transición

### c. Funcionamiento y mantenimiento del secador de lecho fijo.

Para obtener buenos resultados con el uso del secador de capa fija, hay que observar las siguientes recomendaciones:

- Las temperaturas y los espesores de la capa, para varios productos, aparecen en la Tabla 2.1. La temperatura de secado depende del fin que se dará al producto.
- La superficie de la capa de producto se debe nivelar con un rastrillo de madera, después de cargado el secador, para evitar la irregularidad en el flujo de aire

<sup>16</sup> SILVA y LACERDA FILHO, 1984.

- c) Se debe evitar al máximo la compactación del producto.
- d) Se debe revolver el producto a intervalos predeterminados, para evitar la irregularidad en la humedad final del producto, principalmente con temperaturas superiores a 45°C. Para esto, el operador debe desconectar el ventilador y mover el producto con una pala o con rastrillo de madera
- e) El término de la operación de secado depende de varios factores, tales como espesor de la capa, humedades Inicial y final del producto, flujo de aire y temperatura de secado; el operador deberá contar con equipos capaces de determinar el contenido de humedad final del producto. Si el producto está excesivamente seco, el productor perderá dinero al comercializar sobre la base del peso húmedo. Si el producto estuviera demasiado húmedo, quedará expuesto a deterioro durante el almacenamiento.
- f) Al término del secado, se debe interrumpir el calentamiento del aire o abrir todas las entradas de aire frío en la fuente de calor, y dejar el ventilador conectado hasta que la masa de granos alcance una temperatura próxima a la del ambiente. En los secadores con horno de albañilería se debe interrumpir el abastecimiento de leña cuando el contenido medio de humedad del producto llegue a alrededor de uno a dos puntos por ciento de humedad por encima del valor recomendado para almacenarlo, manteniendo el ventilador conectado y haciendo pasar todo el aire por el horno. De este modo, se aprovecha la energía almacenada en las paredes de las tuberías y del horno para terminar el secado de producto, evitando los choques térmicos de enfriamiento
- g) Se debe limpiar el secador después de secar cada partida, retirando los residuos de productos agrícolas que queden sobre la plancha perforada.

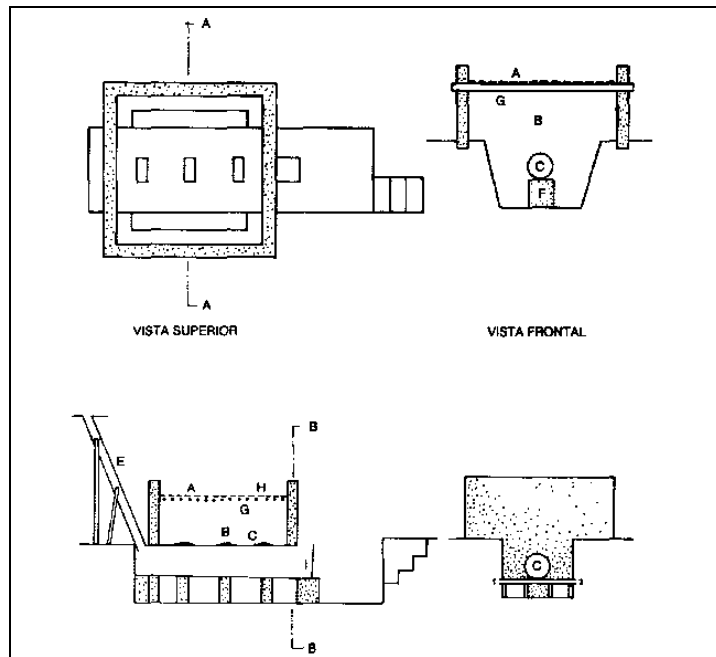
### **3.3.2 Secador con aire movido por convección natural**

El secado artificial es una alternativa que ha dado buenos resultados, pero, en países subdesarrollados o en desarrollo, el uso de secadores ha quedado limitado a las regiones de mayor desarrollo agrícola. El secado con aire natural o calentado, en muchos casos no se puede usar, porque la relación inversión / producto es muy elevada, o incluso por falta de energía eléctrica para accionar el ventilador.

En la mayoría de los secadores el aire pasa por la masa de granos, forzado por medio de ventiladores. Sin embargo, hay secadores en los que el aire se mueve por acción de las diferencias de presión, producidas por la diferencia de temperatura y humedad, entre el aire de secado y el aire ambiente. Estos secadores se denominan secadores con movimiento del aire por convección natural y han tenido éxito en países de África y Asia; han beneficiado principalmente a los agricultores de bajas producciones, con poca capacidad técnica y sin capital para adquirir equipos de secado.

Los secadores con movimiento del aire por efecto de la convección natural se pueden construir con materiales característicos de la región y mano de obra poco especializada. Además, utilizan como combustible la leña o los subproductos de la propiedad rural, talas como la caña de maíz, corontas, paja y demás residuos agrícolas.

El primero de tales secadores de que se tiene noticia es el secador de tipo Samoa, que sirve para secar copra. En este secador se coloca la copra sobre un piso perforado, bajo el cual se quema leña para calentar el aire que pasa por la masa granular por convección natural. El inconveniente de este secador es la contaminación del producto por el humo, además de los daños causados al producto por el calor, pues aquél queda directamente encima del fuego. Entre 1961 y 1963, se hicieron modificaciones al secador Samoa y se le usó en el secado de almendras. Este secador pasó, entonces, a llamarse "Brook" o de Tipo T (Figura 3.12).



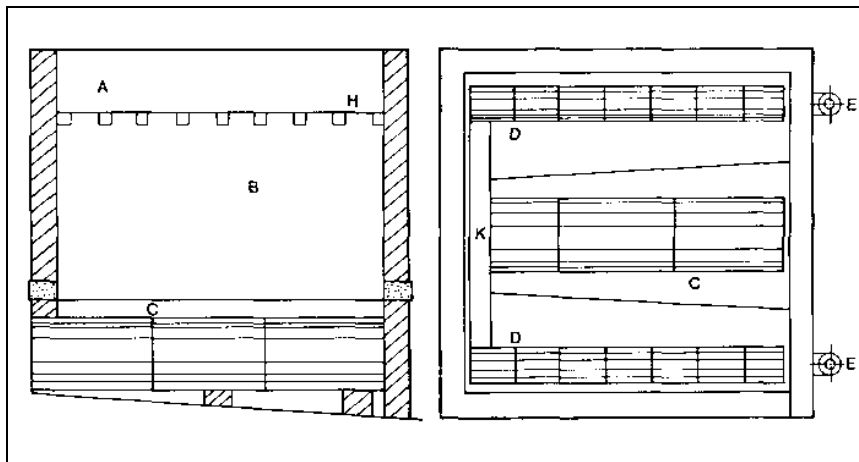
**Figura 3.12** Esquema del secador con aire movido por convección natural<sup>17</sup>

- A. Cámara de secado
- B. Cámara de uní formación de la temperatura del aire caliente de secado
- C. Quemador intercambiados de calor
- E. Chimenea para el escape de gases de combustión
- F. Entrada de aire
- G. Base de sustentación del piso perforado
- H. Piso perforado (malla de alambre galvanizado 1,5 mmx15 m.)
- I. Puerta de entraba de la cámara de combustión

Las principales adaptaciones que se realizaron fueron las siguientes:

- a) adaptación de un intercambiador de calor;
- b) aumento de la altura del piso perforado en rotación con el intercambiados, para obtener mayor uniformidad en la temperatura del aire de secado e Impedir el deterioro del producto por acción del calor;
- c) construcción de una chimenea para la eliminación de los gases de combustión; y
- d) construcción de las paredes del secador en adobe.

Otros investigadores propusieron la adaptación de intercambiadores de calor suplementarios, con el fin de aumentar la superficie de intercambio de calor, con lo que mejoraría la eficiencia térmica del secador (Figura 3.13).



**Figura 3.13** Esquema del secador con aire movido por convección natural

- A. Cámara de secado
- B. Cámara de uniformación de la temperatura del aire caliente de secado
- C. Quemador intercambiados de calor
- D. Intercambiadores de calor adicionales
- E. Chimenea para el escape de gases de combustión
- G. Base de sustentación del piso perforado
- H. Piso perforado (malla de alambre galvanizado 1,5 mmx15 m.)
- K. Cámara de distribución de los gases de combustión

Los parámetros que deben considerarse en la construcción de secadores del tipo Brook son:

- Dimensiones de b entrada de aire. La entrada de aire tiene un efecto significativo sobre el flujo de aire y hay que dimensionarla de manera que la velocidad del aire en ese punto sea inferior a 0,25 m/s;

<sup>17</sup> BROOK, 1964 ab.

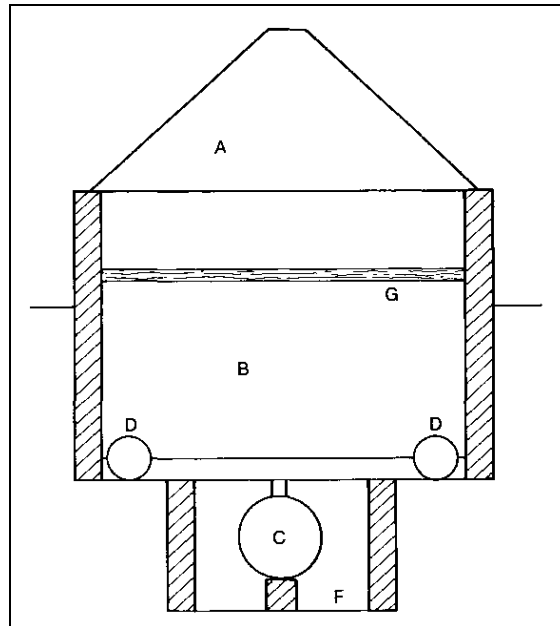


- Espesor de la capa de graneado. El flujo de aire disminuye a medida que aumenta el espesor de la capa de granos;
- Distancia entre el intercambiador de calor y el piso perforado que sostiene el producto. El flujo de aire aumenta linealmente con el incremento de la distancia entre el intercambiador y el piso perforado, y con la diferencia entre la temperatura del aire de secado y la del aire ambiente (se recomienda una distancia mínima de 0,8 m. para evitar el sobrecalentamiento de producto); y
- Superficie de intercambio de calor. El aumento de la superficie de intercambio de calor aumenta la eficiencia térmica del secador y reduce al mínimo la diferencia de temperatura del aire de secado bajo la capa de granos.

Los resultados de las investigaciones señalan que la colocación de una pirámide truncada sobre la cámara de secado (Figura 3.14) mejora significativamente el desempeño del secador en cuestión, pero dificulta la operación de revolver el producto<sup>18</sup>.

---

<sup>18</sup> BERNAL, 1982; ADEYMO, 1979



**Figura 3.14** Esquema del secador con aire movido por convección natural

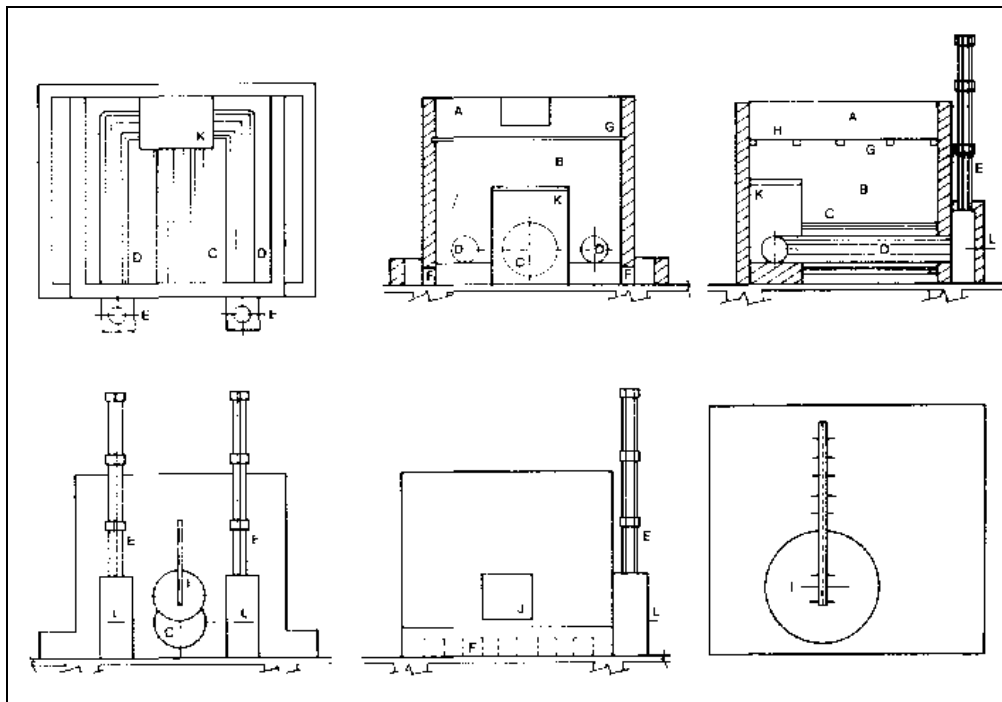
La entrada de aire situada solamente en el frente del secador determina que la distancia que debe haber entre el piso perforado y el intercambiador de calor sea de un metro, por lo menos. Esto es para que exista una temperatura uniforme del aire de secado debajo de la capa de producto que se está secando.

Los secadores con aire movido por convección natural presentan problemas de uniformidad de temperatura y flujo de aire, principalmente por la posición de la entrada de aire en la parte frontal del secador (al lado del quemador). Además, su eficiencia térmica es baja, puesto que la mayor parte de la energía se elimina por las chimeneas, junto con los gases de combustión. En el Centro Nacional de Capacitación en Almacenamiento - CENTREINAR, se construyó una versión del secador de tipo Brook con innovaciones respecto de la entrada de aire ambiente a ser calentado en el quemador - intercambiador de calor.<sup>19</sup>

En la Figura 3.15 aparecen los esquemas de este secador.

<sup>19</sup> PEREIRA et al., 1985.

- A. Cámara de secado
- B. Cámara de uniformación de la temperatura del aire caliente de secado
- C. Quemador intercambiados de calor
- D. Intercambiadores de calor adicionales
- F. Entrada de aire
- G. Base de sustentación del piso perforado



**Figura 3.15.** Esquema del secador con aire movido por convección natural

- A. Cámara de secado
- B. Cámara de uniformación de la temperatura del aire caliente de secado
- C. Quemador intercambiados de calor
- D. Intercambiadores de calor adicionales
- E. Chimenea para el escape de gases de combustión
- F. Entrada de aire
- G. Base de sustentación del piso perforado
- H. Piso perforado (malla de alambre galvanizado 1,5 mm x 1,5 m)
- I. Puerta de entrada de la cámara de combustión
- J. Puerta de inspección de la cámara de uniformación

K Cámara de distribución de los gases de combustión

L Regulación de los gases de la combustión

En este modelo, el quemador-intercambiador de calor se construye con tambores de 0.87 m. de altura por 0,58 m. de diámetro (tambores de 200 litros), sin fondo ni tapa y unidos entre si. El quemador-intercambiador de calor se fija en la pared anterior del secador y en una cámara de distribución de gases de combustión construida en la parte posterior del secador, donde están conectados los intercambiadores de calor adicionales.

Los intercambiadores de calor adicionales, contruidos con tambores de 0,26 m. de diámetro por 0,35 m. de altura, también unidos entre si, van desde la cámara de distribución hasta las chimeneas instaladas en la parte anterior del secador. Las chimeneas se construyen con tubos de barro de 0,10 m. de diámetro.

El quemador-intercambiador se debe instalar en posición inclinada, más alto en la parte posterior del secador, donde se fija en la cámara de distribución de los gases de combustión, para facilitar la eliminación de éstos. Lo mismo se debe hacer con los intercambiadores de calor adicionales, los cuales deben quedar más altos en su unión con las chimeneas. En el quemador se debe colocar una parrilla hecha de hierro de construcción de 1/4", entrelazados, para evitar el contacto directo entre el material que se quema y el tambor. Así, se aumenta la vida útil del tambor y se facilita la combustión.

En la entrada del quemador-intercambiador de calor se coloca una puerta con sistema de regulación, para cerrar parcialmente la entrada del quemador. El propósito de esto es evitar la salida de gases de combustión y también la acción del viento que aumenta la combustión y el consumo de leña. En cuanto a las dimensiones del secador (ancho y largo), sobre la base de los trabajos de investigación de ADEYEMO (1979); BERNAL (1982); BOLDUC (1978); BROOK (1964); PEREIRA et al. (1985), y RYU (1976), no se recomienda que

dichas medidas sean superiores a 3 m. por falta de datos para el dimensionamiento.

## **CAPITULO 4**

### **DISEÑO TERMICO**

#### **4.1 Volumen del producto a secar**

Para el diseño del secador de granos se tomará en cuenta la cantidad de granos que se requiere secar, en el prototipo con capacidad de 30 kg de morochillo.

La masa del morochillo es:

$$m_m = 30 \text{ (kg)}$$

La densidad<sup>20</sup> aparente del morochillo es:

$$\delta_m = 716,1 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

Por lo tanto el volumen del producto a secar es

---

<sup>20</sup> Densidad calculada en Ensayos Laboratorio de Física - ESPE

$$V_{TM} = \frac{m_m}{\delta_m}$$

$$V_{TM} = \frac{30(\text{kg})}{716,1(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3})}$$

$$V_{TM} = 0,04189(\text{m}^3)$$

Entonces  $V_{TM}$  es el volumen de 30 Kg. de morochillo.

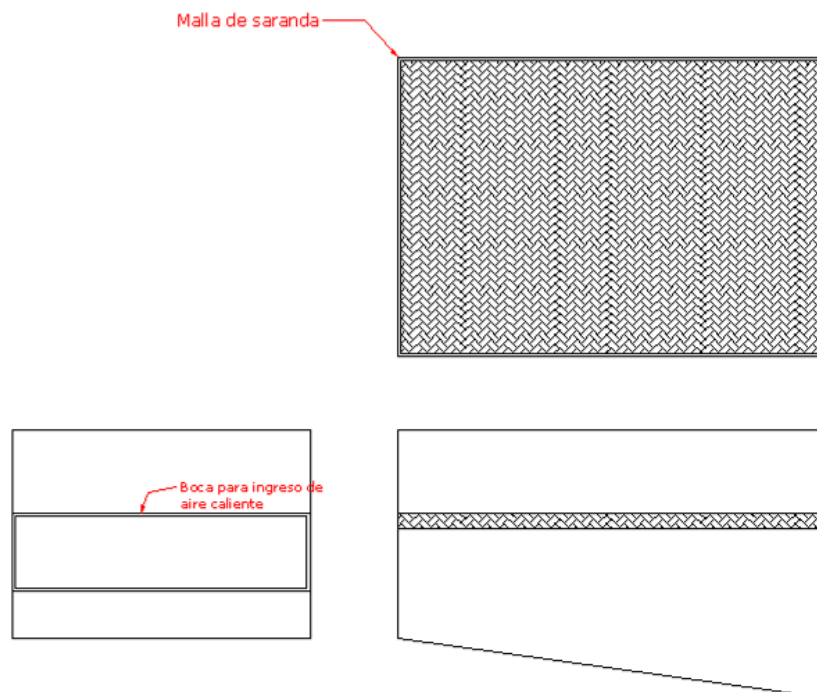
#### 4.2 Dimensiones de la cámara de secado

La altura del producto que debe colocarse en la bandeja durante el proceso de secado recomendada<sup>21</sup> para el caso del morochillo es de 12 a 15 cm.

Para este proceso tomaremos la altura del producto  $h_p$

$$h_p = 0,12 \text{ (m)}$$

La bandeja tendrá una altura de 14 cm., tomando en cuenta que hay que mover el producto durante el proceso.



**Figura 4.1** Disposición de la cámara de secado

<sup>21</sup> Dato obtenido del Internet secado de granos [www.fao.org](http://www.fao.org)

La cámara de secado tendrá una disposición trapezoidal esto con el fin de facilitar la recolección del líquido que puede presentarse durante el secado de los granos, para lo cual se presenta el diseño de la cámara.

Para obtener el ancho y largo de la cámara de secado tomaremos de referencia el volumen del producto a secar así como la altura recomendada de secado y encontraremos el área de la cámara.

$$A_C = \frac{V_{TM}}{h_p}$$

$$A_C = 0,360 (m^2)$$

Para el ancho de cámara tomaremos en cuenta 2 aspectos importantes, primero que al ser un prototipo debe ser de fácil manejo y segundo el optimizar del material (tool galvanizado), para no incrementar el costo del proyecto.

Entonces una vez que proponemos el ancho de cámara (b) y calculada anteriormente el área de cámara  $A_C$ , podemos obtener el largo (L) de la siguiente manera:

$$b = 0,50 (m)$$

$$L = \frac{A_C}{b}$$

$$L = 0,72(m)$$

### **4.3 Cantidad de agua a remover de los granos**

Para poder calcular la cantidad de agua a remover de los granos, debemos saber la humedad inicial<sup>22</sup> y la humedad final que se requiere de la masa de granos que se va a secar.

Humedad Inicial del Grano ( $\phi_i$ ) = 20 %

Humedad final del Grano ( $\phi_f$ ) = 14 %

Masa de granos a secar ( $m_m$ ) = 30 (kg)

Por lo tanto la cantidad de agua ( $m_w$ ) a remover es igual a:

$$m_w = m_m \frac{\left( \frac{\phi_i}{100} - \frac{\phi_f}{100} \right)}{1 - \frac{\phi_f}{100}}$$

$$m_w = 2.16 \text{ (kg)}$$

#### 4.4 Cálculo de calor Sensible

Para determinar el calor sensible o de calentamiento utilizamos la siguiente expresión:

$$Q_s = \dot{m} \times C_p \times \Delta T$$

Donde:

$\dot{m}$ : Flujo másico del producto a calentarse  $\left( \frac{\text{Kg}}{\text{s}} \right)$

$C_p$ : Calor específico  $\left( \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} \times ^\circ\text{C}} \right)$

$\Delta T$ : Delta de temperaturas ( $^\circ\text{C}$ )

$Q_s$ : Calor sensible (KJ)

Para encontrar el  $C_p$  del producto a secar se utiliza la expresión en función de la humedad del producto<sup>23</sup>.

$$C_p = (1.675 + 0.025 \times w) \left( \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} \times ^\circ\text{C}} \right)$$

---

<sup>22</sup> Piladora Villares Wilo, Ventanas Provincia de Los Ríos, 2003

<sup>23</sup> SINGH, P., Introducción a la ingeniería de Alimentos, España, ACRVIA, p. 155



Donde  $w$  es el contenido de agua en porcentaje.

El contenido de humedad del producto es de alrededor del 20 %.

La temperatura de secado<sup>24</sup> ( $T_s$ ), para el morochillo y la temperatura ambiente ( $T_a$ ), promedio son respectivamente:

$$T_s = 60 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_a = 22 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\phi_i = 20 \text{ (\%)}$$

$$C_p = 1.675 + 0.025 \times \phi_i$$

$$C_p = 2.175 \left( \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} \times ^\circ\text{C}} \right)$$

$$Q_s = m_m \times C_p \times (T_s - T_a)$$

$$Q_s = 2.479 \times 10^3 \text{ (KJ)}$$

#### 4.5 Calor latente de los granos

Para determinar el calor latente de los granos, utilizamos la fórmula.

$$Q_L = \dot{m}_W \times h_{fg}$$

Donde:

$$\dot{m}_W = \text{Masa de agua a removerse}$$

$$h_{fg} = \text{Calor de vaporización del agua (KJ/Kg.)}$$

El agua total a removerse es

$$m_W = 2.16 \text{ (Kg.)}$$

Conocidos el calor de vaporización del agua<sup>25</sup>  $h_{fg} = 2257 \text{ KJ/Kg}$  y la cantidad de agua que vamos a retirar, obtenemos el calor latente de evaporación.

---

<sup>24</sup> FAO, Manual de manejo poscosecha de granos, Tabla 19, español, 2001

<sup>25</sup> CENGEL, Termodinámica, 4ta ed, México, McGraw Hill, p. 728

$$Q_L = 4875,12(\text{KJ})$$

$$Q_L = 4.875 \times 10^3 (\text{KJ})$$

#### 4.6 Masa de los granos secos

La masa seca de granos la podemos obtener conociendo la humedad inicial y final del producto, además de la masa de los granos frescos, en la siguiente ecuación:

$$m_s = m_m \times \frac{(100 - \phi_i)}{100}$$

$$m_s = 24 (\text{kg})$$

#### 4.7 Calor útil en la cámara de secado

El calor útil es el calor aprovechado por el producto y es el producto de la suma de calor sensible (QS) y el calor latente (QL)

$$Q_s = 2.479 \times 10^3 (\text{KJ})$$

$$Q_L = 4.875 \times 10^3 (\text{KJ})$$

La misma que sería igual a

$$Q_{UCS} = Q_s + Q_L$$

$$Q_{UCS} = 7.354 \times 10^3 (\text{KJ})$$

El secado de los granos (morochillo) se realiza en 2 horas de secado, por lo tanto  $Q_{UCS}$  se le debe para este tiempo.

$$Q_{UCS} = \frac{Q_{UCS}}{2}$$

$$Q_{UCS} = 3.677 \times 10^3 \text{ (KJ/h)}$$

$$Q_{UCS} = 1021.38 \text{ (W)}$$

#### **4.8 Pérdidas de calor en la cámara de secado**

Las pérdidas de calor en la cámara de secado se dan por las paredes de la cámara de secado

##### **4.8.1 Pérdidas de calor por las paredes de la cámara de secado**

###### **4.8.1.1 Coeficiente de convección interna en la cámara de secado**

Como la cámara de secado es de sección rectangular el número de Reynolds se determina tomando en cuenta el radio hidráulico.

$$b = 0.50 \text{ (m)}$$

$$L = 0.72 \text{ (m)}$$

El área de la sección es

$$A = b \times L$$

$$A = 0.36 \text{ (m}^2\text{)}$$

El perímetro mojado de la sección rectangular es:

$$P_m = 2 \times (b + L)$$

$$P_m = 2.44 \text{ (m)}$$

La velocidad del aire para secado de los granos es de  $0.15 \text{ m/s}^{26}$

---

<sup>26</sup> FAO, Manual de manejo poscosecha de granos, Tabla 16, español, 2001

$$V_s = 0.15 \left( \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)$$

El radio hidráulico es:

$$RH = \frac{4A}{Pm}$$

$$RH = 0.590(\text{m})$$

La viscosidad cinemática del aire a 60 ° C es

$$v = 19.62 \times 10^6 \left( \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right)$$

Por lo tanto el número de Reynolds es

$$Re = \frac{V_s \times RH}{v}$$

$$Re = 4.512 \times 10^3$$

Para determinar el número de Nusselt

$$Nu = 0.023 \times Re^{0.8} \times Pr^n$$

Donde:

n = constante para el enfriamiento del fluido

$$n = 0.3$$

$$Pr = 0.689$$

$$Nu = 0.023 \times Re^{0.8} \times 0.689^{0.3}$$

$$Nu = 17.246$$

Igualando el número de Nusselt a la ecuación:

$$Nu = \frac{h \times D}{k}$$

Donde

$$h = \text{coeficiente de convección} \left( \frac{W}{m^2 \times ^\circ K} \right)$$

D = diámetro, (radio Hidráulico)

$$k = \text{coeficiente de conductividad de la superficie en contacto en} \left( \frac{W}{m \times ^\circ K} \right)$$

$$h_i = Nu \times \frac{k}{RH}$$

$$h_i = 1256.913 \left( \frac{W}{m^2 \times ^\circ K} \right)$$

#### 4.8.1.2 Coeficiente de convección externa a la cámara de secado

La velocidad del aire en la zona de Ventanas, Provincia de Los Ríos

$$V_a = 1 \left( \frac{m}{s} \right)$$

Para determinar el coeficiente de convección externo empleamos la expresión, que esta en función de la velocidad del viento.

$$h_o = 2.8 + 3 V_a$$

$$h_o = 5.8 \left( \frac{W}{m^2 \times ^\circ K} \right)$$

#### 4.8.1.3 Coeficiente global de transferencia de calor en la pared de la cámara de secado

Empleando la analogía eléctrica se puede determinar la resistencia que presenta los elementos de la pared al paso de calor, los mismos que son:

R1: Resistencia convectiva interna.

R2: Resistencia debido a la lámina de acero de 1 mm

R3: Resistencia convectiva externa.

Conductividad térmica de acero

$$K_{ac} = 43 \left( \frac{W}{m^{\circ}K} \right)$$

Espesor de la lámina de acero

$$e_{ac} = 0.001 \text{ (m)}$$

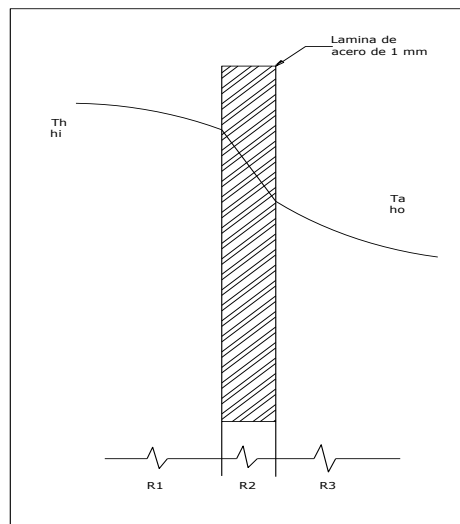


Figura 4.2 Pared de

la cámara de secado

Las resistencias térmicas en la pared son:

$$R_1 = \frac{1}{h_i}$$

$$R_1 = 7.956 \times 10^{-4} \left( \frac{m^2 \cdot ^{\circ}K}{W} \right)$$

$$R_2 = \frac{e_{ac}}{k_{ac}}$$

$$R_2 = 2.326 \times 10^{-5} \left( \frac{m^2 \cdot ^{\circ}K}{W} \right)$$

$$R3 = \frac{1}{h_o}$$

$$R3 = 0.172 \left( \frac{\text{m}^2 \cdot \text{°K}}{\text{W}} \right)$$

Estos resultados nos ayudarán a obtener el coeficiente global de transferencia de calor

$$U_o := \frac{1}{R1 + R2 + R3}$$

$$U_o = 5.773 \left( \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{°K}} \right)$$

Para determinar la pérdida de calor por las paredes de la cámara de secado a partir de la siguiente expresión:

$$Q_{pp} := U_o \cdot A_T \cdot (T_h - T_a)$$

Donde:

$T_h$  = Temperatura máxima del aire dentro de la cámara

$T_a$  = Temperatura ambiente

Las temperaturas son las siguientes:

$$T_s = 80 \text{ (°C)}$$

$$T_a = 22 \text{ (°C)}$$

El área de las paredes de la cámara de secado está en función  $b$  y  $L$  que son ancho y largo respectivamente. Para el caso de la forma de nuestra cámara de secado y la forma trapezoidal, tomaremos una altura promedio  $h_{pr} = 0.4$  (m).

$$b = 0.5 \text{ (m)}$$

$$L = 0.72 \text{ (m)}$$

$$A_T = 2 \times h \times L + 2 \times b \times h + b \times L$$

$$AT = 1.336 \text{ (m}^2\text{)}$$

Reemplazando en la ecuación anterior

$$Q_{pp} := U_o \cdot AT \cdot (T_h - T_a)$$

$$Q_{pp} = 447.306 \text{ (W)}$$

#### 4.8.2 Pérdidas de calor por la salida de aire utilizado en el secado

La temperatura del aire a la salida ( $T_s$ ) de la cámara de secado es aproximadamente:

$$T_s = 60 \text{ }^\circ\text{C}$$

El calor específico del aire es:

$$C_p = 1.008 \left( \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} \times ^\circ\text{C}} \right)$$

El flujo de aire que se requiere para el secado, se puede estimar a partir del calor útil en el horno así:

$$Q_{UCS} = m_{\text{aire}} \times C_p \times \Delta T$$

$$1.021 \frac{\text{KJ}}{\text{s}} = m_{\text{aire}} \times 1.008 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} \times ^\circ\text{C}} \times (80-22) \text{ }^\circ\text{C}$$

$$m_{\text{aire}} = 0.017 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Utilizando la ecuación del calor sensible tenemos el calor perdido debido a la salida del aire cargado de humedad en la cámara de secado.



$$Q_{ps} = m_{aire} \times C_p \times (T_s - T_a)$$

$$Q_{ps} = 0.017 \frac{\text{Kg}}{\text{s}} \times 1.005 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} \times ^\circ\text{K}} \times (60 - 22)^\circ\text{C}$$

$$Q_{ps} = 0.667 (\text{Kw})$$

$$Q_{ps} = 667 (\text{W})$$

#### 4.9 Calor requerido en la cámara de secado

El calor requerido en la cámara de secado es la suma del calor útil en la cámara y el calor perdido en las paredes y en el aire.

$$Q_r = Q_{ucs} + Q_{pp} + Q_{ps}$$

$$Q_r = 1916 (\text{Wh})$$

#### 4.10 Calentamiento de aire

El calentamiento del aire se va a realizar por medio de un intercambiador de calor, donde el aire circula por dentro de los tubos del intercambiador y los gases de combustión por fuera.

La temperatura inicial y final del aire dentro de los tubos, es decir, a la entrada ( $T_a$ ) y salida ( $T_{m\acute{a}x}$ ) son respectivamente las siguientes.

$$T_a = 22 (^\circ\text{C})$$

$$T_{max} = 90 (^\circ\text{C})$$

La viscosidad cinemática

$$v = 20.93 \times 10^{-6} \left( \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right)$$

Longitud de tubo

$$L_{tb} = 0.75 (\text{m})$$

Espesor del tubo

$$e_{tb} = 0.0015 \text{ (m)}$$

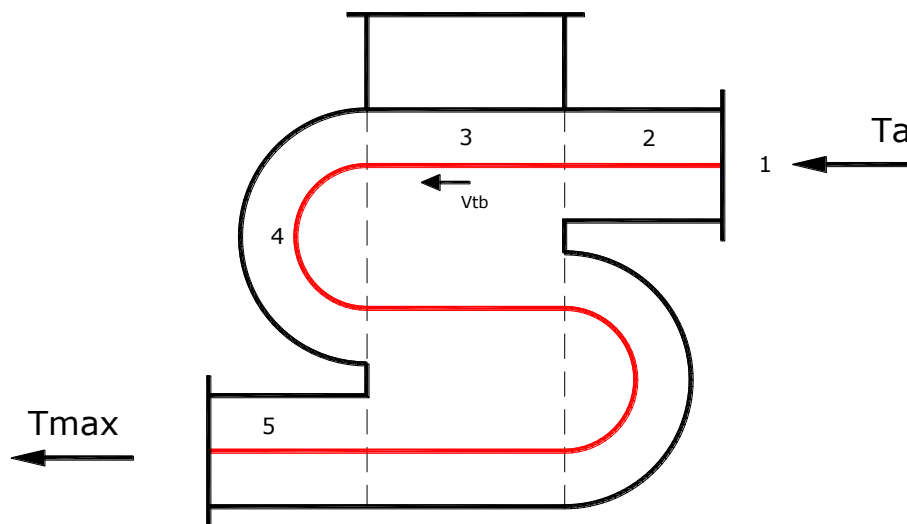
Diámetro nominal del tubo

$$D = 0.0254 \text{ (m)}$$

Diámetro interior del tubo

$$D_i = D - 2 e_{tb}$$

$$D_i = 0.0224 \text{ (m)}$$



**Figura 4.3** Disposición de los tubos para el calentamiento del aire

#### 4.10.1 Coeficiente de convección interna del tubo

Calcularemos el número de Reynolds que presenta el aire en el sitio.

La velocidad promedio del aire recomendado en el interior del tubo es

$$V_{aire_{tb}} = 10 \left( \frac{m}{s} \right)$$

Para tubos el número de Reynolds es igual a

$$Re = \frac{V_{airetb} \times Di}{\nu}$$

$$Re = 1.07 \times 10^4$$

El intercambiador de calor tiene un haz de tubos en flujo transversal, por lo tanto se utilizará la expresión que permite determinar el coeficiente de convección interno al tubo ( $hi_{tb}$ )

Donde  $C1$  y  $n$  son constantes debido a la configuración escalonada de los tubos.

$$C1 = 0.522$$

$$n = 0.562$$

$$hi_{tb} := \frac{Re \cdot C1 \cdot kac}{Di}$$

$$hi_{tb} = 1.072 \times 10^7 \left( \frac{W}{m^2 \cdot K} \right)$$

#### 4.10.2 Coeficiente de convección externo al tubo

Para determinar el coeficiente de convección externo al tubo, hacemos uso de la expresión que está en función de la velocidad.

Como los gases de combustión son los que van a circular por fuera de los tubos, necesitamos su velocidad.

Para determinar esta velocidad es preciso primero calcular el tiro de la chimenea.

El tiro de la chimenea<sup>27</sup> se calcula de la siguiente manera

$$\text{Tiro (mmH}_2\text{O)} = 4.63 \times B \times \left( \frac{1}{T_c} - \frac{\omega_1}{T_g} \right) \times X$$

Donde:

---

<sup>27</sup> TRINKS, W. Hornos Industriales, español, p. 386

B = Presión atmosférica en cm.Hg.

$\omega$  = Densidad específica de los gases de combustión con relación al aire.

X = Altura de la chimenea (m)

T<sub>c</sub> = temperatura del aire ambiente (°K)

T<sub>g</sub> = temperatura de los gases de combustión promedio en la chimenea (°K).

La densidad del aire, presión atmosférica y temperatura de la zona de Ventanas en la Provincia de Los Ríos, son respectivamente:

$$\rho_c = 0.799 \left( \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right)$$

$$B = 71.61 \text{ (cmHg)}$$

$$T_c = 295 \text{ °K}$$

La densidad específica de los gases de combustión es:

$$\omega_1 := 0.972$$

La temperatura promedio de los gases de combustión es

$$T_g = 353 \text{ °K}$$

La altura de la chimenea es:

$$X = 0.2 \text{ (m)}$$

Entonces el tiro es

$$\text{tiro} := 4.63 \cdot B \cdot \left( \frac{1}{T_c} - \frac{\omega}{T_g} \right) \cdot X$$

$$\text{tiro} = 0.042 \text{ (mmH}_2\text{O)}$$

La velocidad de los gases en la chimenea se determina con la siguiente expresión

$$\text{Tiro (mmH}_2\text{O)} = \frac{v_{gc}^2}{2 \times g \times \frac{1}{\rho_h}}$$

Donde:

$$V_{gc} = \text{velocidad de los gases de combustión} \left( \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)$$

$$g = \text{gravedad} \left( \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right)$$

$$\rho_h = \text{densidad de los gases de la combustión en} \left( \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right)$$

El volumen específico de los gases de combustión es:

$$\rho_h := \rho_c \cdot \omega$$

$$\rho_h = 0.777 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

$$V_{gc} = \sqrt{\text{tiro} \times 19.6 \times \frac{1}{\rho_h}}$$

$$V_{gc} = 1.032 \left( \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)$$

Con la velocidad de los gases, tenemos el coeficiente de convección externa en el tubo del intercambiador de calor.

$$h_{o_{tb}} = 2.8 + 3 \times V_{gc}$$

$$h_{o_{tb}} = 5.896 \left( \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \times \text{K}} \right)$$

#### 4.10.3 Coeficiente global de transferencia de calor en el tubo

Radio externo del tubo

$$r2 := \frac{D}{2}$$

$$r2 = 0.0127 \text{ (m)}$$

Radio interno del tubo

$$r1 := r2 - \text{etb}$$

$$r1 = 0.0112 \text{ (m)}$$

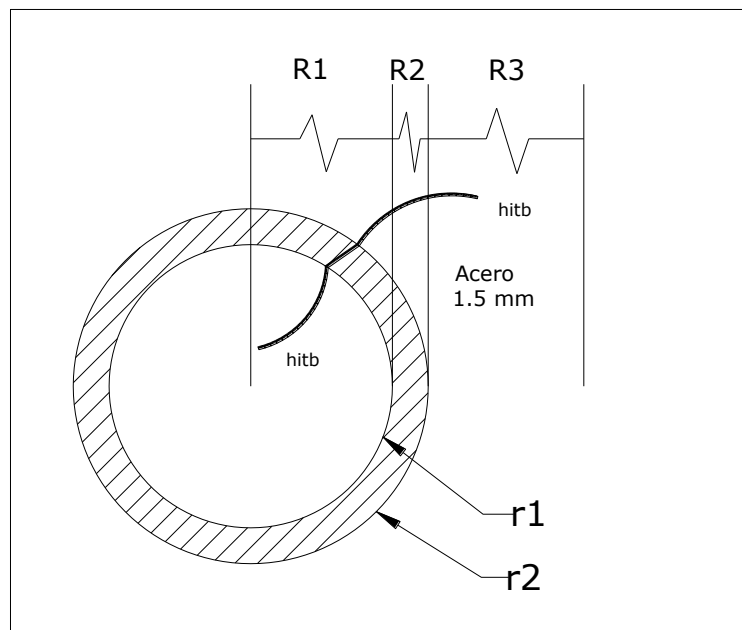
Utilizando la analogía eléctrica se puede determinar las resistencias térmicas presentan los elementos en la pared del tubo.

Por lo que:

R1: Resistencia convectiva interna

R2: Resistencia conductiva debido al espesor del tubo

R3: Resistencia convectiva externa



**Figura 4.4** Pared del Tubo del intercambiador

$$R1 := \frac{r2}{r1 \cdot \text{hitb}}$$

$$R1 = 1.058 \times 10^{-7} \left( \frac{\text{m}^2 \times \text{°K}}{\text{W}} \right)$$

$$R2 := r2 \cdot \frac{\ln\left(\frac{r2}{r1}\right)}{kac}$$

$$R2 = 3.712 \times 10^{-5} \left( \frac{m^2 \times ^\circ K}{W} \right)$$

$$R3 := \frac{1}{hotb}$$

$$R3 = 0.17 \left( \frac{m^2 \times ^\circ K}{W} \right)$$

Obteniéndose de esta forma el coeficiente global de transferencia de calor

$$Uot := \frac{1}{R1 + R2 + R3}$$

$$Uot = 5.894 \left( \frac{W}{m^2 \times ^\circ K} \right)$$

#### 4.10.4 Coeficiente global de transferencia de calor en el tubo con incrustación

Durante el funcionamiento del intercambiador los gases o líquidos, se produce gradualmente una película de suciedad sobre la superficie en la que se produce la transferencia de calor.

El Factor de incrustación para este caso es:

$$Rd = 0.0004 \left( \frac{m^2 \times ^\circ K}{W} \right)$$

Empleando la ecuación siguiente tenemos el coeficiente global de transferencia después de haberse producido el depósito.

$$Ud := \frac{1}{Rd + \frac{1}{Uot}}$$

$$Ud = 5.881 \left( \frac{W}{m^2 \times ^\circ K} \right)$$

#### 4.10.5 Cálculo de calor útil en un tubo del intercambiador de calor

El área lateral de transferencia de calor en un tubo es:

$$D = 0.0254$$

$$L_{tb} := 0.75$$

$$A_{tb} := \pi \cdot D \cdot L_{tb}$$

$$A_{tb} = 0.0598$$

Calor útil en un tubo es:

$$Q_{tb1} = U_d \times A_{tb} \times (T_{max} - T_a)$$

$$Q_{tb1} = 23.93 \text{ (Wh)}$$

#### 4.10.6 Cálculo del número de tubos en el intercambiador

Para determinar el número de tubos, dividimos el calor que se requiere en la cámara de secado  $Q_r$  para el calor útil en un tubo

$$Q_r = 1916 \text{ (Wh)}$$

$$n_{tbs} := \frac{Q_r}{Q_{tb1}}$$

$$n_{tbs} = 80.061$$

$$n_{tbs1} := \frac{n_{tbs}}{3}$$

$$n_{tbs1} = 26.687$$

Para el intercambiador que propusimos cada paso constará de 26 tubos

#### 4.10.7 Calor útil en la cámara de calentamiento de aire

El Calor útil para el calentamiento del aire por medio del intercambiador de calor, se determina multiplicando el número de tubos por el calor útil en un tubo, así tenemos lo siguiente:



$$Q_{tbs} = Q_{tb1} \times ntbs1$$

$$Q_{tbs} = 622.223 \text{ (Wh)}$$

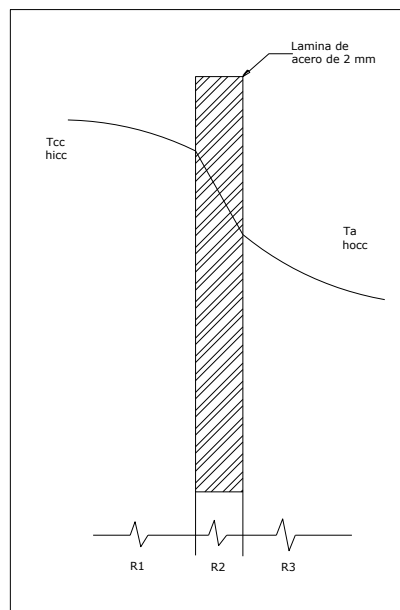
#### 4.10.8 Pérdidas de calor en la cámara de calentamiento de aire

Las pérdidas de calor en la cabina de calentamiento del aire se producen tres partes:

- En las paredes de la cámara de combustión
- En las paredes del intercambiador de calor
- En la salida de los gases de combustión

##### 4.10.8.1 En las paredes de la cámara de combustión

En las paredes de la cámara de combustión se tiene lo siguiente:



**Figura 4.5** Pared de la cámara de combustión

##### 4.10.8.2 Coeficiente de convección externo

Para poder encontrar el coeficiente de convección externo que afecta a nuestro proyecto debemos tomar en cuenta la velocidad de aire<sup>28</sup> del sitio en donde va a funcionar el secador de granos.

---

<sup>28</sup> INAHMI, año 2003

$$v = 1.5 \left( \frac{m}{s} \right)$$

$$h_{occ} = 2.8 + 3 \times v$$

$$h_{occ} = 7.3 \left( \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ K} \right)$$

La temperatura de la llama adiabática real para la cascarilla de arroz es alrededor de 480 °C por lo que:

$$T_{cc} = 480 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

$$T_a = 22 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

#### **4.10.8.3 Coeficiente de convección interno**

El coeficiente de convección interno para la cámara de combustión toma en cuenta la temperatura de la llama adiabática de la cascarilla de arroz de la velocidad de la propagación de la llama

$$h_{icc} = 5.569 \left( \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ K} \right)$$

#### **4.10.8.4 Coeficiente global de transferencia de calor**

Empleando analogía eléctrica se puede determinar las resistencias térmicas que presenta los elementos de la pared al paso de calor.

R1 = Resistencia convectiva interna

R2 = Resistencia conductiva debido a la lámina de hacer de 2 mm

R3 = Resistencia convectiva externa

$$R1 = \frac{1}{h_{icc}}$$

$$R1 = 0.18 \left( \frac{m^2 \cdot ^\circ K}{W} \right)$$

$$e_{acc} = 0.002 \text{ (m)}$$

$$R_2 = \frac{e_{acc}}{K_{acc}}$$

$$R_2 = 4.651 \times 10^{-5} \left( \frac{\text{m}^2 \times ^\circ\text{K}}{\text{W}} \right)$$

$$R_3 = \frac{1}{h_{occ}}$$

$$R_3 = 0.137 \left( \frac{\text{m}^2 \times ^\circ\text{K}}{\text{W}} \right)$$

Una vez encontradas las resistencias, podemos obtener el coeficiente global de transferencia de calor en las paredes de la cámara de combustión.

$$U_{oc} = \frac{1}{R_1 + R_2 + R_3}$$

$$U_{oc} = 3.159 \left( \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \times ^\circ\text{K}} \right)$$

Para el área de transferencia de calor en la cámara de combustión debemos tomar en cuenta las caras laterales de la misma, por lo que

$$\text{Ancho} = 0.28 \text{ (m)}$$

$$\text{Largo} = 0.25 \text{ (m)}$$

$$\text{Alto} = 0.4 \text{ (m)}$$

$$A_{cc} = 0.424 \text{ (m}^2\text{)}$$

El calor perdido en las paredes de la cámara de combustión es:

$$Q_{pcc} := U_{oc} \cdot A_{cc} \cdot (T_{cc} - T_a)$$

$$Q_{pcc} = 613.37 \text{ (Wh)}$$

#### 4.10.8.5 En las paredes del intercambiador de calor

En las paredes de la cámara del intercambiador tenemos la presencia de los gases de combustión por el interior y el aire ambiente por fuera.

#### **4.10.8.6 Coeficiente de convección externo**

Por encontrarse en el mismo sitio en el que se encuentra la cámara de combustión este será igual al que se determino para la pared de la cámara de combustión.

$$hoic = 7.3 \left( \frac{W}{m^2 \times ^\circ K} \right)$$

#### **4.10.8.7 Coeficiente de convección interno**

Este coeficiente de convección interno, es el mismo coeficiente de convección externo que se cálculo para el tubo del intercambiador.

$$hiic = ho_{tb}$$

$$hiic = 5.896 \left( \frac{W}{m^2 \times ^\circ K} \right)$$

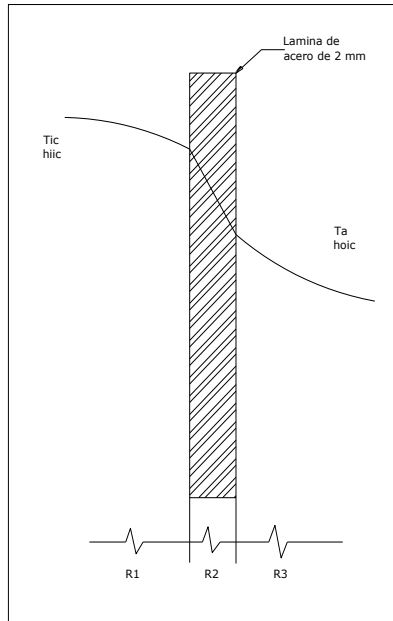
#### **4.10.8.8 Coeficiente global de transferencia de calor**

Empleando analogía eléctrica se puede determinar las resistencias térmicas que presentan los elementos de la pared al paso de calor.

R1 = Resistencia convectiva interna

R2 = Resistencia conductiva debido a la lámina de hacer de 2 mm

R3 = Resistencia convectiva externa



**Figura 4.6** Pared del intercambiador de Calor donde se encuentran los tubos

$$R1 = \frac{1}{h_{iic}}$$

$$R1 = 0.17 \left( \frac{m^2 \times ^\circ K}{W} \right)$$

$$e_{acc} = 0.002 \text{ (m)}$$

$$R2 = \frac{e_{acc}}{K_{ac}}$$

$$R2 = 4.651 \times 10^{-5} \left( \frac{m^2 \times ^\circ K}{W} \right)$$

$$R3 = \frac{1}{h_{oic}}$$

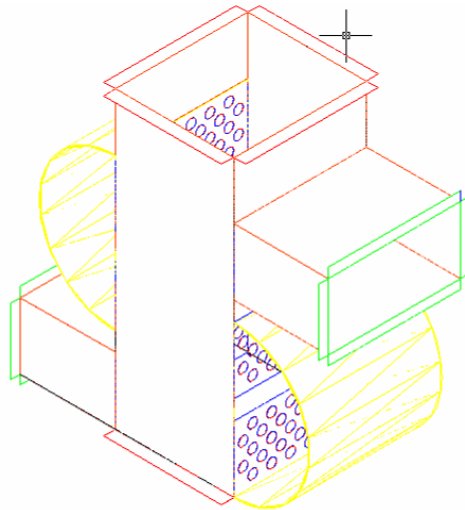
$$R3 = 0.137 \left( \frac{m^2 \times ^\circ K}{W} \right)$$

Teniendo de esta manera el coeficiente global de transferencia de calor de la pared en el intercambiador

$$U_{oic} = \frac{1}{R_1 + R_2 + R_3}$$

$$U_{oic} = 3.261 \left( \frac{W}{m^2 \times ^\circ K} \right)$$

El área de transferencia de calor es la suma de las cuatro paredes del intercambiador



**Figura 4.7** Intercambiador de Calor

El área es:

$$A_{ic} = 0.818 \text{ (m}^2\text{)}$$

La temperatura de pared promedio ( $T_p$ ) dentro del intercambiador es:

$$T_p = 160 \text{ } ^\circ\text{C}$$

El calor perdido en las paredes del intercambiador es:

$$Q_{pic} := U_{oic} \cdot A_{ic} \cdot (T_p - T_a)$$

$$Q_{pic} = 368.133 \text{ (Wh)}$$

#### 4.10.8.9 En la salida de los gases de combustión

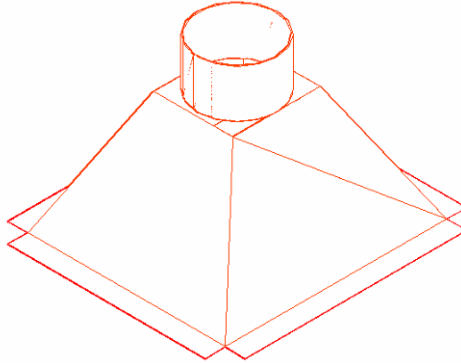
Las pérdidas de calor en la salida de los gases de combustión se producen en la campana y en la chimenea.

La temperatura de pared donde empieza la campana es:

$$T_{sg} = 60 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

El área de la campana y el tubo de chimenea son:

$$A_s = 0.13 \text{ (m}^2\text{)}$$



**Figura 4.8** Campana y chimenea

El calor pedido a la salida es:

$$Q_{pg} := A_s \cdot h_{otb} \cdot (T_{sg} - T_a)$$

$$Q_{pg} = 29.08 \text{ (Wh)}$$

#### **4.10.9 Calor requerido para el calentamiento del aire**

El calor requerido para calentar el aire que se va a utilizar en la cámara de secado es la suma de calor útil y el calor perdido en la cámara de combustión.

Esto es

$$Q_{T_{req}} = Q_{tbs} + Q_{pec} + Q_{pic} + Q_{pg}$$

$$Q_{T_{req}} = 1.633 \times 10^3 \text{ (Wh)}$$

Como se trata de un valor teórico es conveniente tener un margen sobre este valor por eso vamos a asumir un calor total requerido de

$$Q_T = 2.5 \text{ (KWh)}$$

#### 4.10.10 Cálculo del flujo másico de combustible

Como vamos a emplear cascarilla de arroz, el poder calorífico<sup>29</sup> es de:

$$PC_{cas} := 16328.52 \left( \frac{KJ}{Kg} \right)$$

El flujo másico de cascarilla arroz necesario es:

$$\dot{m}_{cascarilla} = \frac{QT}{PC_{cas}}$$

$$\dot{m}_{cascarilla} = 0.153 \left( \frac{kg}{h} \right)$$

#### 4.11 Cálculo del aire necesario para el secado

Para determinar el aire necesario a emplearse en el secado de los granos (morochillo), debemos conocer la entalpía del aire en el sitio donde va a trabajar el secador. Para esto utilizaremos las cartas psicrométricas, conociendo la presión atmosférica y la altitud de la zona de Ventanas (Los Ríos).

Presión Atmosférica = 95.457 [ kPa ]

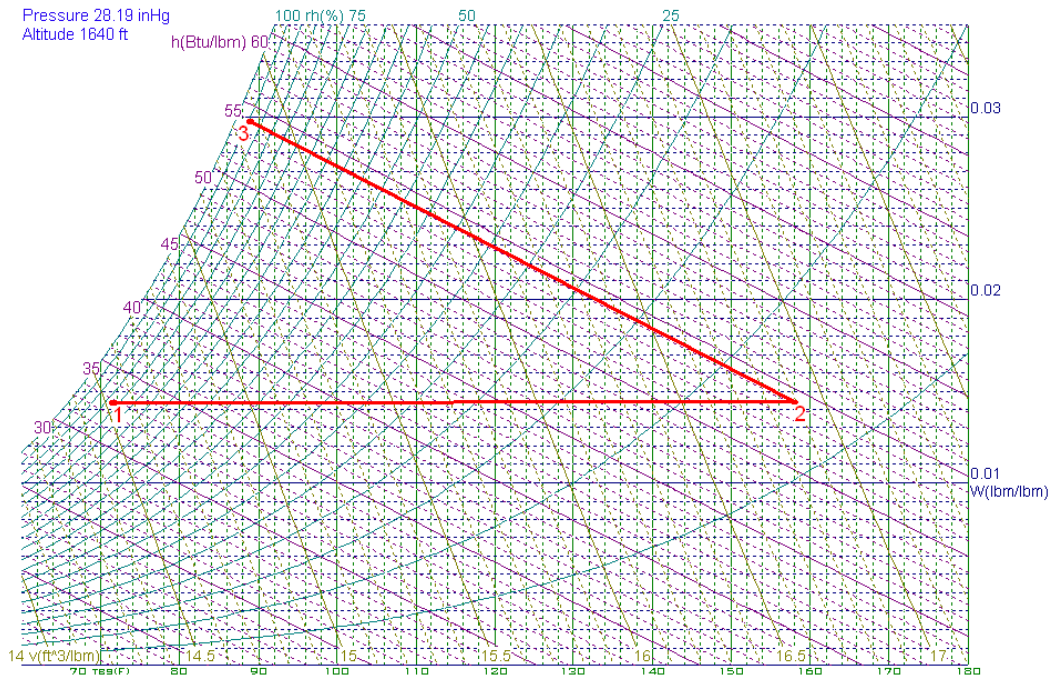
Altitud = 500 msnm

Para este cálculo se empleó el programa Akton para psicrometría.

---

<sup>29</sup> FAO, Manual de manejo poscosecha de granos, español, 2001





**Figura 4.9** Procesos psicrométricos del secador

Como se observa en la carta psicrométrica, se tiene el proceso en el secado de granos. El reporte de los procesos que presenta el programa se encuentra en la siguiente tabla:

**Tabla 4.1** Reporte del proceso de secado

Process Report											
C:\Documents and Settings\Usuario\Mis documentos\programas\TESIS DE GRADO\TESIS SECADOR\final.psy											
	W	tbs	rh	v	h	tpr	twh	Vtot	m	ma	mw
	lbm/lbm	F	%	ft <sup>3</sup> /lbm	Btu/lbm	F	F	CFM	lbm	lbm	lbm
1	0.0144	71.6*	82*	14.53	32.81	65.8	67.5	0.98533*	0.06879	0.06782	0.0009747
2	0.0144*	158*	7.03	16.89	54.17	65.9	87.5	1.1457*	0.0688	0.06782	0.0009766
3	0.0297	89*	94	15.37	54*	87	87.4	1.0422*	0.06984	0.06782	0.002017

Para el aire a la entrada del punto 1, es decir al ambiente, ingresamos con:

Humedad relativa del sitio = 82 %

Temperatura ambiente = 22 °C

$$h1 := 76.31 \left( \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} \right)$$

$$\rho1 := 1.102 \left( \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right)$$

Para el aire caliente a la salida en el punto 2, ingresamos con la temperatura máxima de 70 °C de bulbo seco y humedad específica constante con lo cual se tiene:

Entalpía del aire a la salida del intercambiador

$$h2 := 126 \left( \frac{\text{kJ}}{\text{Kg}} \right)$$

Densidad del aire a la salida

$$\rho2 := 0.948 \left( \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right)$$

La densidad media del aire es:

$$\rho_m := \frac{(\rho1 + \rho2)}{2}$$

$$\rho_m = 1.025 \left( \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right)$$

El flujo de aire necesario para el secado se determina a partir de la ecuación:

$$Q_T = m_{\text{aire}} \times (h2 - h1)$$

Donde

$Q_T$  = Calor requerido para el calentamiento del aire (KW)

$h2$  = entalpía del aire caliente (Kj/Kg)

$h1$  = entalpía del aire al ambiente (KJ/Kg)

$m_{\text{aire}}$  = caudal másico de aire necesario para el secado (Kg/s)

$$Q_T := 2.5$$

$$m_{\text{aire}} := \frac{Q_T}{h2 - h1}$$

$$m_{\text{aire}} = 0.05 \left( \frac{\text{Kg}}{\text{s}} \right)$$

Dividiendo para la densidad media de aire se tiene:

$$f_{aire} := \frac{m_{aire}}{\rho_m}$$

$$f_{aire} = 0.049 \left( \frac{m^3}{s} \right)$$

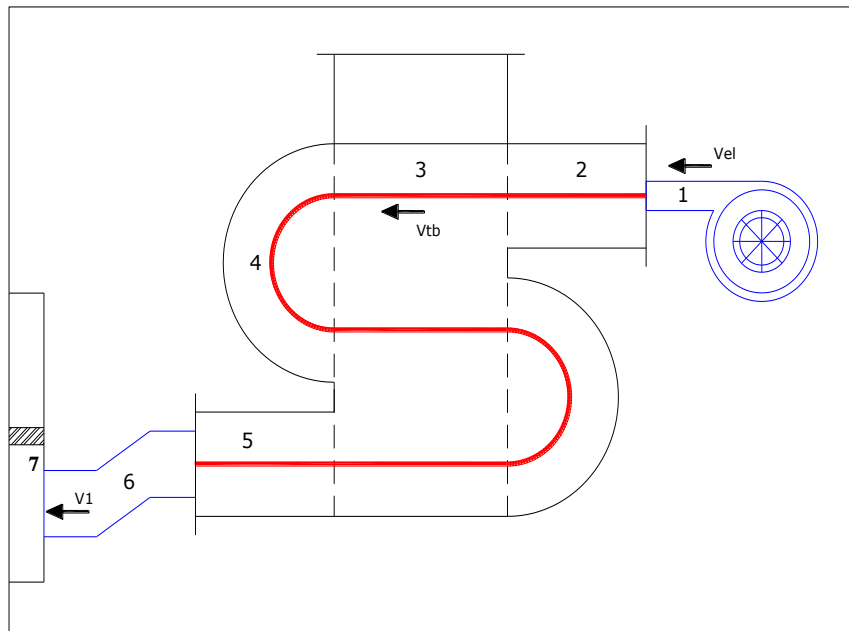
En pies cúbicos por minuto (CFM) se tiene:

$$f_{aire} = 103.81 \left( \frac{pie^3}{min} \right)$$

Esto quiere decir que se requiere un ventilador mínimo de 110 CFM.

#### 4.12 Cálculo de las pérdidas de presión

Las caídas de presión estarán directamente afectadas de acuerdo al recorrido que va a tener el aire en el proceso. Para esto tomaremos en cuenta lo siguiente:



**Figura 4.10** Pérdidas de presión del aire

1. Conducto de entrada

2. Entrada a tubos
3. Partes rectas de los tubos
4. Giro de deflector
5. Salida de tubos
6. Conducto de salida
7. Ingreso a cámara de secado

Datos:

Viscosidad promedio del aire

$$\nu := 2.19 \cdot 10^{-5} \left( \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right)$$

Gravedad

$$g = 9.81 \left( \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right)$$

Peso específico del aire

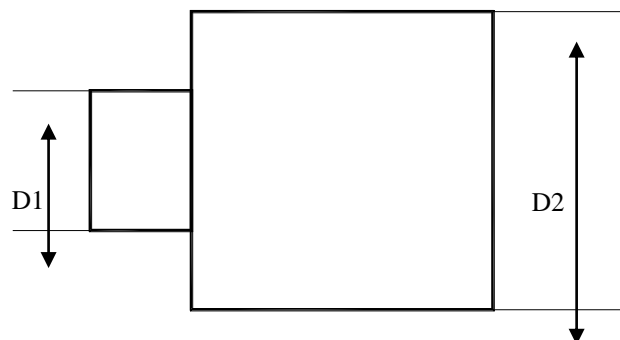
$$\gamma := 9.27 \left( \frac{\text{N}}{\text{m}^3} \right)$$

Flujo de aire

$$f_{\text{aire}} = 0.049 \left( \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right)$$

### 1. Conducto de entrada a los tubos

En este conducto ocurre una dilatación gradual mínima ya por la geometría de nuestro del mismo



**Figura 4.11** Conducto de entrada. Vista superior

Diámetro equivalente al final del conducto  $D_2^{30}$

$$a := 0.14$$

$$b := 0.28$$

$$D_2 := \frac{1.3 \cdot (a \cdot b)^{\frac{5}{8}}}{(a + b)^{\frac{1}{4}}}$$

$$D_2 = 0.213 \text{ (m)}$$

Diámetro al inicio del conducto es:

$$D_1 := 0.16 \text{ (m)}$$

Con  $D_2 / D_1$  y el ángulo de  $2^\circ$  que es el mínimo, escogemos  $K$  de la siguiente tabla.

**Tabla 4.2** Coeficiente de resistencia – dilatación gradual

$D_2 / D_1$	Angulo del cono,										
	2	6	10	15	20	25	30	35	40	45	50
1.1	0.01	0.01	0.03	0.05	0.10	0.13	0.16	0.18	0.19	0.20	0.21
1.2	0.02	0.02	0.04	0.09	0.16	0.21	0.25	0.29	0.31	0.33	0.35
1.4	0.02	0.03	0.06	0.12	0.23	0.30	0.36	0.41	0.44	0.47	0.50
1.6	0.03	0.04	0.07	0.14	0.26	0.35	0.42	0.47	0.51	0.54	0.57
1.8	0.03	0.04	0.07	0.15	0.28	0.37	0.44	0.50	0.54	0.58	0.61
2.0	0.03	0.04	0.07	0.16	0.29	0.38	0.46	0.52	0.56	0.60	0.63
2.5	0.03	0.04	0.08	0.16	0.30	0.39	0.48	0.54	0.58	0.62	0.65
3.0	0.03	0.04	0.08	0.16	0.31	0.40	0.48	0.55	0.59	0.63	0.66
$\infty$	0.03	0.05	0.08	0.16	0.31	0.40	0.49	0.56	0.60	0.64	0.67

$$K = 0.02$$

Por lo tanto la velocidad del aire al inicio del conducto será:

$$\text{vel} := \frac{\text{faire}}{\pi \cdot \frac{D_1^2}{4}}$$

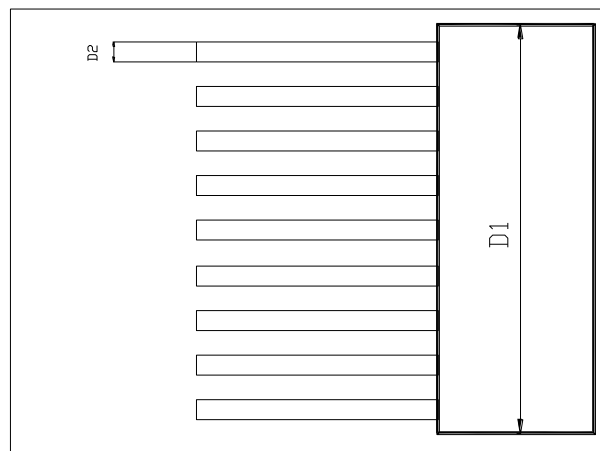
$$\text{vel} = 2.441 \left( \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)$$

En una dilatación siempre ocurre una subida de presión que es:

$$\Delta P_1 := \left( k_1 \cdot \frac{vel^2}{2 \cdot g_1} \right) \cdot \gamma$$

$$\Delta P_1 = 0.056 \text{ (Pa)}$$

## 2. Entrada del aire a los tubos



**Figura 4.12** Entrada de tubos. Vista superior

El diámetro equivalente del conducto de entrada es:

$$D_1 = 0.213 \text{ (m)}$$

El área transversal de un tubo del intercambiador es:

$$D_2 = 0.0224 \text{ (m)}$$

$$A_{tb} := \pi \cdot \frac{D_2^2}{4}$$

$$A_{tb} = 3.941 \times 10^{-4} \text{ (m}^2\text{)}$$

Aplicando la ecuación de la continuidad se tiene la velocidad del aire en el tubo

---

<sup>30</sup> MOTT. R., Mecánica de Fluidos 4ta ed. México, Prentice Hall, p. 519

$$v_{tb} := \frac{f_{aire}}{A_{tb} \cdot n_{tbs}}$$

$$v_{tb} = 4.782 \left( \frac{m}{s} \right)$$

Con  $D1 / D2$  y la velocidad del aire en los tubos, escogemos  $K$  para contracción súbita.

$$k = 0.46$$

El número de tubos del intercambiador de calor es:

$$n_{tbs} := 26$$

En contracción de secciones de tubería ocurre una caída de presión que, para nuestro caso es de:

$$\Delta P_2 := - \left[ \left[ \left( k \cdot \frac{v_{tb}^2}{2 \cdot g_2} \right) \cdot n_{tbs} \right] \cdot \gamma \right]$$

$$\Delta P_2 = -8.437 \text{ (Pa)}$$

### 3. Partes recta de los tubos

La longitud de los tubos de las partes recta es:

$$L_{rtb} = 0.75 \text{ (m)}$$

Diámetro interior de un tubo del intercambiador de calor es:

$$D_{it} = 0.0224 \text{ (m)}$$

El número de Reynolds es:

$$\text{Reynolds} := \frac{v_{tb} \cdot D_2}{\nu}$$

$$\text{Reynolds} = 4.891 \times 10^3$$

La rugosidad del tubo se tomo de la tabla:

**Tabla 4.3** Rugosidad de conductos

Material	Rugosidad, $\epsilon$ (m)
Vidrio, plástico	Suavidad
Cobre, latón, plomo (tubería)	$1.5 \times 10^{-6}$
Hierro fundido: sin revestir	$2.4 \times 10^{-4}$
Hierro fundido: revestido de asfalto	$1.2 \times 10^{-4}$
Acero comercial o acero soldado	$4.6 \times 10^{-5}$
Hierro forjado	$4.6 \times 10^{-5}$
Acero remachado	$1.8 \times 10^{-3}$
Concreto	$1.2 \times 10^{-3}$

$$\epsilon_{tb} := 4.6 \cdot 10^{-5} \text{ (m)}$$

La rugosidad relativa es:

$$\epsilon_{rel} := \frac{D2}{\epsilon_{tb}}$$

$$\epsilon_{rel} = 486.957$$

El factor de fricción se determina de la siguiente expresión:

$$f := \frac{0.25}{\log\left(\frac{1}{3.7 \cdot \epsilon_{rel}} + \frac{5.74}{\text{Reynolds}^{0.9}}\right)^2}$$

$$f = 0.041$$

La caída de presión en las partes rectas de los tubos es:

$$\Delta P3 := -\left[\left[\left(f \cdot \frac{v_{tb}^2}{2 \cdot g3} \cdot \frac{L_{rtb}}{D2}\right) \cdot n_{tbs}\right] \cdot \gamma\right]$$

$$\Delta P3 = -382.265 \text{ (Pa)}$$



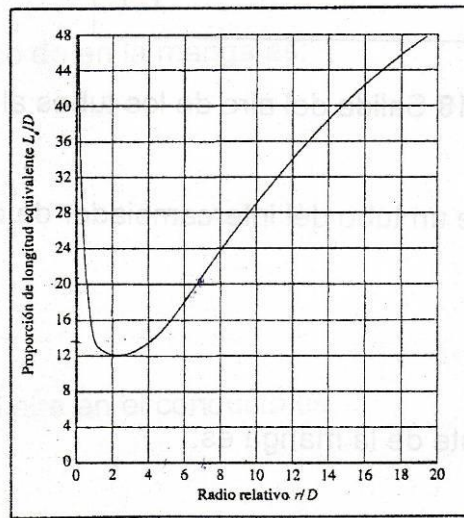
#### 4. Giros de los deflectores a 180°

Las pérdidas de presión en los deflectores se dan por fricción. El número de deflectores es

$n_{def} = 4$  considerando codos de 90°

El radio interno de deflector es:

$r_{def} = 0.16$  (m)



**Figura 4.13** Resistencia debido a codos de 90°

La longitud equivalente es:

$L_e = 20$

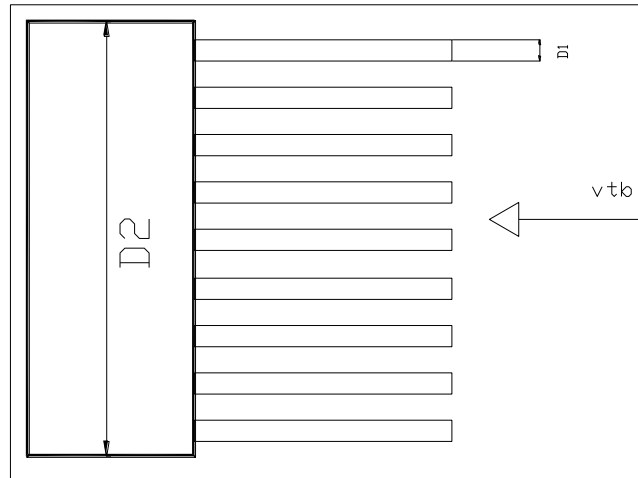
La pérdida de presión por los deflectores es:

$$\Delta P_4 := - \left[ \left[ \left( f \cdot \frac{v_{tb}^2}{2 \cdot g_4} \cdot L_e \right) \cdot n_{def} \right] \cdot \gamma \right]$$

$$\Delta P_4 = -35.129 \text{ (Pa)}$$

#### 5. Salida del aire de los tubos

En la salida del aire de los tubos se produce una dilatación súbita. El conducto que se ubica en la salida del aire, tiene las mismas dimensiones de entrada.



**Figura 4.14** Salida de aire de tubos.

El diámetro interno de un tubo del intercambiador de calor es:

$$D1 = 0.0224 \text{ (m)}$$

El diámetro equivalente del ducto es:

$$D2 = 0.213 \text{ (m)}$$

El coeficiente de resistencia se determina de la siguiente ecuación<sup>31</sup>:

$$k := \left[ 1 - \left( \frac{D1}{D2} \right)^2 \right]^2$$

$$k = 0.978$$

En este caso se produce una subida de presión que es:

$$\Delta P5 := \left[ \left( k \cdot \frac{v_{tb}^2}{2 \cdot g_5} \right) \cdot n_{tbs} \right] \cdot \gamma$$

$$\Delta P5 = 275.015 \text{ (Pa)}$$

<sup>31</sup> MOTT. R., Mecánica de Fluidos 4ta ed. México, Prentice Hall, p. 269

## 6. Conducto de salida

En el conducto de salida se produce fricción. El diámetro equivalente del ducto y longitud es:

$$D2 = 0.213 \text{ (m)}$$

$$L_{\text{manga}} = 0.2 \text{ (m)}$$

El radio hidráulico del ducto es:

$$a := 0.28$$

$$b := 0.14$$

$$Rh := \frac{a \cdot b}{2 \cdot (a + b)}$$

$$Rh = 0.047 \text{ (m)}$$

La velocidad del aire en el conducto es.

$$\text{faire} := 0.049$$

$$v1 := \frac{\text{faire}}{a \cdot b}$$

$$v1 = 1.25 \left( \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)$$

El número de Reynolds en el conducto es:

$$re := \frac{v1 \cdot (4 \cdot Rh)}{\nu}$$

$$re = 1.065 \times 10^4$$

La rugosidad relativa del conducto es:

$$r_{\text{real}} := \frac{D2}{\varepsilon}$$

$$r_{\text{real}} = 4.63 \times 10^3$$

El factor de fricción es:

$$f := \frac{0.25}{\log\left(\frac{1}{3.7 \cdot r_{\text{real}}} + \frac{5.74}{\text{re}^{0.9}}\right)^2}$$

$$f = 0.031$$

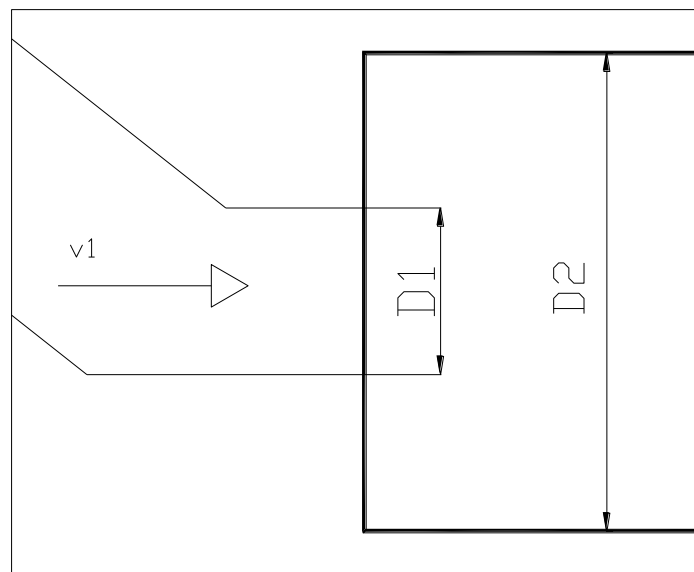
La pérdida de presión en el ducto de salida es:

$$\Delta P_6 := f \cdot \frac{v_1^2}{2 \cdot g_6} \cdot \frac{L_{\text{mang}}}{D_2}$$

$$\Delta P_6 = 2.308 \times 10^{-3} \text{ (Pa)}$$

### 7. Ingreso a la cámara de secado

En este lugar se produce una dilatación súbita.



**Figura 4.15** Ingreso a la cámara de secado

El diámetro equivalente de acople ducto es

$$D_1 = 0.213 \text{ (m)}$$

La velocidad del aire caliente en el ducto es:

$$v1 = 1.25 \left( \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)$$

El diámetro equivalente de la cámara de secado

$$c := 0.28(\text{m})$$

$$d := 0.5(\text{m})$$

$$D2 := \frac{1.3}{(c+d)^{\frac{1}{4}}} (c \cdot d)^{\frac{5}{8}}$$

$$D2 = 0.405 \text{ (m)}$$

El coeficiente de resistencia se determina por:

$$k := \left[ 1 - \left( \frac{D1}{D2} \right)^2 \right]^2$$

$$k = 0.523$$

En este caso se produce una subida de presión que es

$$\Delta P7 := \left( k \cdot \frac{v1^2}{2 \cdot g7} \right) \cdot \gamma$$

$$\Delta P7 = 0.386$$

#### 4.13 Presión estática del ventilador

La presión estática que se requiere en el ventilador se determina sumando las caídas y subidas de presión obtenidas anteriormente.

Por lo que:

$$\Delta PT := -(\Delta P1 + \Delta P2 + \Delta P3 + \Delta P4 + \Delta P5 + \Delta P6 + \Delta P7)$$

$$\Delta PT = 150.371 \text{ (Pa)}$$

$$\Delta PT = 0.0218 \text{ (psi)}$$

$$\Delta PT = 0.604 \text{ (plg\_H}_2\text{O)}$$

#### 4.14 Selección del ventilador.

Para la selección del ventilador, es necesario conocer el caudal del aire y la presión estática. Con estos valores y con la disponibilidad del mercado local, se ha seleccionado un ventilador axial de las siguientes características:

Caudal de aire:	100 (CFM)
RPM:	400
Ducto de Salida:	16 (cm)
Voltaje	110 (V)

## CAPITULO 5

### CONSTRUCCION Y MONTAJE

#### 5.1 Materiales, Equipos, Herramientas e Instrumentos utilizados en la construcción

Durante el proceso de construcción del Horno Secador de Granos se utilizaron materiales, insumos, equipos así como implementos de seguridad personales los cuales se detallan a continuación:

**Tabla 5.1.** Lista de materiales

Cant	U	Descripción
------	---	-------------

1	U	Ventilador centrifugo
1	U	Ventilador axial
2	U	Planchas Acero al carbono ASTM A36 2mm
4	U	Planchas acero carbono. ASTM A36 1/20"
10	U	Tubos acero sin cost. de 3"ced 40
2	U	Planchas de tol negro 1.5 mm
6	U	Tubos de acero de 1"
5	Kg	Electrodos E6011-E6013 (kg)
1	Glb	Cables de poder
5	U	Broca HSS de 1/4
1	U	Disco de desbaste 7"
1	U	Cepillo de acero
1	Gal	Pintura para altas temperaturas
200	U	Pernos 1/4 " x 1"
400	U	Rodelas 1/4
6	U	Lija de agua # 180

**Tabla 5.1.** Lista de materiales (Continuación....)

6	U	Lija de agua # 220
6	U	Sierra Sandflex grano grueso
3	Par	Bisagras de 1/4 , para soldar
2	U	Angulo 1/2" x 1/2" x 6 m
1	U	Malla de zaranda
2	Par	Monogafas
1	Par	Guantes
2	U	Overoles
2	U	Faja lumbar talla L
2	U	Mascarillas 3M, con filtro para Vapores Orgánicos y Ácidos
2	U	Interruptores 220 V.
1	Gal	Anticorrosivo
2	U	Enchufes 110V-200V

**Tabla 5.2.** Máquinas y equipos utilizados

**Equipos:**

**Guillotina para acero:**



**Características:**

- Panel de control eléctrico.
- Switch de encendido principal
- Pedal para accionar el corte
- Corte máximo de 2 mm. de espesor
- Voltaje: 220 V, motor eléctrico.


**Sierra de vaivén:**

**Características:**

- Longitud de la sierra: 14 "
- Voltaje: 120 V.


	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bomba de refrigeración</li> <li>- Switch de fin de corte</li> <li>- Motor eléctrico</li> </ul>
---	---

**Tabla 5.2. Máquinas y equipos utilizados (Continuación...)**


<p><b>Cortadora de Plasma:</b></p> 	<p><b>Características:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Tablero de control para el amperaje y tipo de operación a realizar.</li> <li>- Voltaje: 220 V. o trifásico</li> <li>- Bomba de refrigeración</li> <li>- Switch de encendido principal</li> <li>- Alimentación de aire comprimido</li> <li>- Amperaje: 20 A.</li> </ul>
---	--

<p><b>Dobladora Manual universal:</b></p> 	<p><b>Características:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Contrapesos en las dos palancas.</li> <li>- 18 muelas desplazables</li> </ul>
---	---



<p><b>Taladro de pedestal:</b></p> 	<p><b>Características:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Potencia: 620 W.</li> <li>- RPM: 1725</li> <li>- Voltaje: 110 V</li> <li>- Amperaje 10 A</li> </ul> <p>NOTA: Permite usar juego de brocas hasta 22 mm</p>
--	---

**Tabla 5.2.** Máquinas y equipos utilizados (Continuación...)

<p><b>Amoladora</b></p> 	<p><b>Características:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Se puede usar discos de corte y desbaste.</li> <li>- Potencia: 2000 W</li> <li>- RPM: 3000</li> <li>- Frecuencia: 50 -60 Hz</li> </ul>
--	--

**Tabla 5.3.** Herramientas e Instrumentos de fabricación

Herramienta / Instrumento	Característica
Tijeras	Para cortar tool
Sierra	Grano fino y grueso
Martillos	20 lb
Destornilladores	Plano y estrella
Alicate	De presión
Rayador	Para Acero
Compás de puntas	De 50 cm. de diámetro
Flexómetro	3 m
Escuadra metálica	8 plg
Nivel	Imantado
Brocas	Para acero diferentes medidas

## 5.2 Sistema de calentamiento

El sistema que nos permite calentar el aire que se utilizará en el proceso de secado de granos esta compuesto por cuatro secciones:

- Pulmón de aire y recolección de ceniza
- Cámara de combustión.
- Intercambiador de Calor
- Tiro.

### 5.2.1 Pulmón de aire y Recolección de ceniza

El espesor de esta sección es de 2 mm, por lo que no requiere de estructura interna, ya que al realizar el dobléz de la lámina y juntarlas producen una auto estructura.

Por esta sección se realiza el aporte de aire para la combustión a través de un ventilador centrífugo por un orificio lateral.

Además se tiene una compuerta para retirar la ceniza que se produce por la combustión de la cascarilla de arroz, ya que esta sección se encuentra debajo de la cámara de combustión.

Entre sección de pulmón de aire y la cámara de combustión existe una malla que permite que la cascarilla de arroz no caiga al pulmón y se produzca el 95% de la combustión de la cascarilla.



Figura 5.1. Sección de Pulmón de aire

### 5.2.2 Cámara de combustión

La cámara de combustión está conformada por láminas de acero de 2 mm de espesor esto con el fin de que las paredes de la cámara no se deformen por las altas temperaturas que se presentan en el interior del mismo cuando se produce la combustión de la cascarilla la cual genera un calor de llama de alrededor 450 °C.

Tomando en cuenta que el espesor de la cámara es de 2 mm, ésta sección no requiere de estructura interna, ya que al realizar el doblado de la lámina y juntarlas producen una auto estructura.

Interiormente no se ha colocado ninguna pintura de protección ya que sería un desperdicio debido a que existirán gases de combustión y altas temperaturas que contribuirían a que esta protección se despenda enseguida.

En esta sección se tendrá una compuerta que servirá para poder mover o retirar cascarilla de exceso dentro de la cámara. Además de una ventana lateral por donde se alimentará de cascarilla hacia la cámara.

El diagrama de operaciones y de procesos, referente a la construcción del intercambiador de calor se muestra en los anexos B y C.



**Figura 5.2.** Cámara de combustión

### **5.2.3 Intercambiador de Calor**

La construcción del intercambiador de calor se la realiza tomando en cuenta que el aire que se utilizará para el secado de los granos no debe contener ningún tipo de contaminación.

Tomando en cuenta que el espesor del intercambiador, es de 2 mm, ésta sección no requiere de estructura interna, ya que al realizar el doblado de la lámina y juntarlas se produce una auto estructura

Por tal motivo se requiere que los gases de la combustión de la cascarilla calienten el aire del ambiente que pasan a través de los tubos con un arreglo triangular, de los tres pasos de nuestro intercambiador, ingresando el aire a temperatura ambiente 20 °C y saliendo a 70 °C.

Así contamos con un diferencial de 10°C de calentamiento de aire en primer paso tomando en cuenta que el aire ambiente se encuentra a 20°C. Para el segundo paso se produce un incremento de 25°C con respecto al ambiente y al final de intercambiador pasando por la tobera que se conecta al ingreso de la cámara de secado a 70°C.



**Figura 5.3.** Intercambiador de Calor

Para este intercambiador entre paso y paso no se ha realizado el doblado de tubería debido a que el radio de curvatura es muy pequeño y no se cuenta con una matriz para hacerlo, por lo que se ha fabricado deflectores curvos, los mismos que conectan tanto en primero y el segundo paso y de igual forma del segundo al tercer paso con esto mejoramos y evitamos turbulencia dentro del intercambiador. Estos deflectores se encuentran unidos a las secciones del intercambiador por medio de pernos de 1/4" con el fin de que sirvan para hacer limpieza de los tubos del intercambiador o reparaciones que se requieran.

Interiormente no se ha colocado ninguna pintura de protección ya que sería un desperdicio debido a que existirán gases de combustión y altas temperaturas que contribuirían a que esta protección se despenda enseguida.

El diagrama de operaciones y de procesos, referente a la construcción del intercambiador de calor se muestra en los anexos B y C.

### 5.2.4 Tiro

La parte más importante de la evacuación de los gases de combustión es el Tiro, el cual para su construcción se lo realizó en el mismo espesor que las secciones anteriores de 2 mm.



**Figura 5.4.** Tiro o Campana

Hay que señalar que todo el módulo donde se encuentra el pulmón de aire, la cámara de combustión, el intercambiador y el tiro se encuentran recubiertos por pintura resistente a altas temperaturas.



**Figura 5.5.** Módulo de combustión e Intercambiador

### **5.3 Cámara de secado**

Para esta parte del proceso, se ha elegido una sola bandeja de cámara abierta en la cual consta de una malla de acero (zaranda) en la mitad de la misma. Esta malla ayudará que el aire que se concentra en el parte inferior de la cámara fluya hacia el producto a secar (aire caliente sube al producto).

Esta cámara se la fabrico en tool galvanizado de 1.0 mm de espesor, solo con doblez y no se utilizo estructura de soporte debido a la rigidez producto de las juntas (sueldas) que se hicieron.





**Figura 5.6.** Cámara de secado

Esta tiene una ventana lateral por donde se conecta con la tobera conformada del mismo material que la cámara, la misma que une el módulo del intercambiador con la cámara de secado,

La forma geométrica de la cámara de secado en la parte inferior es trapezoidal, ya que se requiere recoger la humedad que se puede desprender del producto durante el proceso.

Tanto el interior como el exterior de la cámara fue recubierto con pintura de altas temperaturas, esta pintura no es tóxica, no contamina, ni afecta la calidad del producto a secar.



**Figura 5.7** Campana difusora

Todos los elementos del Secador de granos se encuentran conformados, con bridas construidas de ángulo de  $\frac{1}{2}$ " x  $\frac{1}{2}$ " con 3 orificios de  $\frac{1}{4}$ " por lado, para pernos de  $\frac{1}{4}$  x 1" que serán los elementos utilizados para la unión de las partes.





**Figura 5.8** Partes con bridas de ángulo.



**Figura 5.9** Conjunto Secador Armado

## **CAPITULO 6**

### **PRUEBAS DE OPERACIÓN DEL EQUIPO**

#### **6.1 Pruebas**

Para realizar las pruebas de operación de la Secadora de Granos se tienen dos objetivos principales como son:

- Comprobar el funcionamiento de la cámara de secado
- Secar el producto en 2 horas o menos.

## 6.2 Parámetros y variables

Luego de realizar el acople y montaje de las secciones del secador y la cámara de secado se procede a realizar las pruebas de funcionamiento del secador de granos.

Para verificar que los objetivos planteados inicialmente se cumplan es necesario fijar los parámetros y variables a utilizarse, los cuales son:

Tabla 6.1. Parámetros de prueba

ORDEN	PARAMETROS	SIMBOLO	UNIDAD
1	Temperatura de secado en cámara	$T_{SC}$	(°C)
2	Tiempo de Secado	$T_s$	(min)
3	Temperatura de Cámara de Combustión	$T_{CC}$	(°C)
4	Temperatura de gases de Combustión	$T_{GC}$	(°C)
5	Humedad ambiente	$H_{AMB}$	(%)

## 6.3 Equipos e Instrumentos

Para realizar las pruebas de secado se requieren los siguientes equipos:

### a) Suministro de aire

Para el suministro de aire se utiliza un ventilador centrífugo, de conducto cilíndrico, el cual proporciona el aire a la cámara de combustión y se encuentra en la parte inferior del equipo. El mismo consta de un regulador a la salida de su boca.

Para el caso del aire que se utilizará para el secado de los granos, se utiliza un ventilador axial, conectado directamente al ducto que ingresa al intercambiador de calor y que a su vez se encuentra conectado por la tobera a la cámara de secado.

**b) Intercambiador de Calor**

Este se encuentra conformado por la cámara de combustión, el intercambiador de calor y el tiro en la parte superior.

**c) Cámara de secado**

Conformada por una bandeja la cual contiene una malla horizontal en su parte media, utilizando la parte inferior como pulmón de ingreso del aire calentado por el intercambiador. Para evitar que el aire solo llegue a la parte posterior de la cámara se ha dotado de un deflector en la parte media con el objetivo de retener aire caliente en la mitad de la cámara.

Los instrumentos a utilizarse para el registro de los parámetros son:

- Controlador de temperatura:  
Marca: Fullgauge Control  
Rango: -50 a 105 °C  
Apreciación 0.1 °C
- Balanza digital  
Marca: Ohaus  
Rango: 0 a 3000 g  
Apreciación: 0.01 g
- Termómetro de temperatura manual
- Medidor de Humedad en el ambiente Marca Digital
- Cronómetro

## **6.4 Procedimiento**

Las pruebas de secado de los granos (morochillo), se la realizó de la siguiente manera:

- Alimentar con cascarilla de arroz la cámara de combustión y encenderla con un líquido combustible para iniciar la combustión.
- Encender los ventiladores del pulmón y el aire caliente de ingreso al intercambiador.
- Pesar aproximadamente 30 kg de granos (morochillo), la misma que será la carga que se coloca en la bandeja, teniendo una altura de 20 cm aproximadamente del producto.

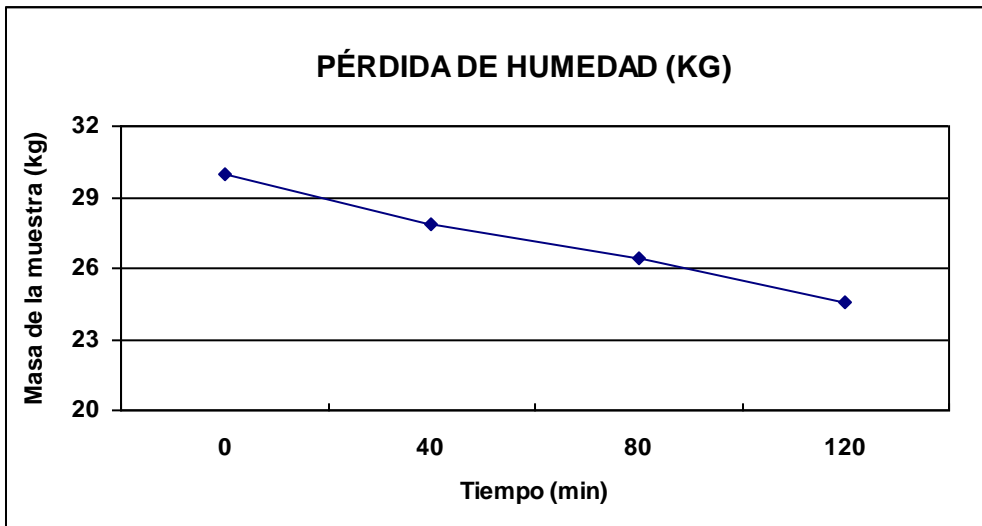
- Una vez colocado el producto y encendido el equipo se irán haciendo la toma de los datos establecidos cada 10 minutos.
- El tiempo de combustión de la cascarilla de arroz es de 4 segundos, por lo que la alimentación de la misma debe ser continua y de manera ligera, no se debe colocar la cascarilla de forma abundante ya que esto provocaría que la llama de combustión se apague.
- Es conveniente que se remueva de vez en cuando la cascarilla dentro de la cámara de combustión y el retiro de la ceniza que se encontrará en la parte inferior de la misma.
- El producto se deberá mover constantemente para evitar que solo una parte de los granos se seque.
- Transcurridos 40 minutos, retirar el producto seco y pesar
- Luego de 40 minutos, retirar el producto seco y nuevamente pesar
- Y por ultimo transcurrido 40 minutos, retirar el producto y pesar. Con esto se secaría un saco de 30 kg, en dos horas desde cuando se inicio el proceso.

## 6.5 Evaluación de los resultados

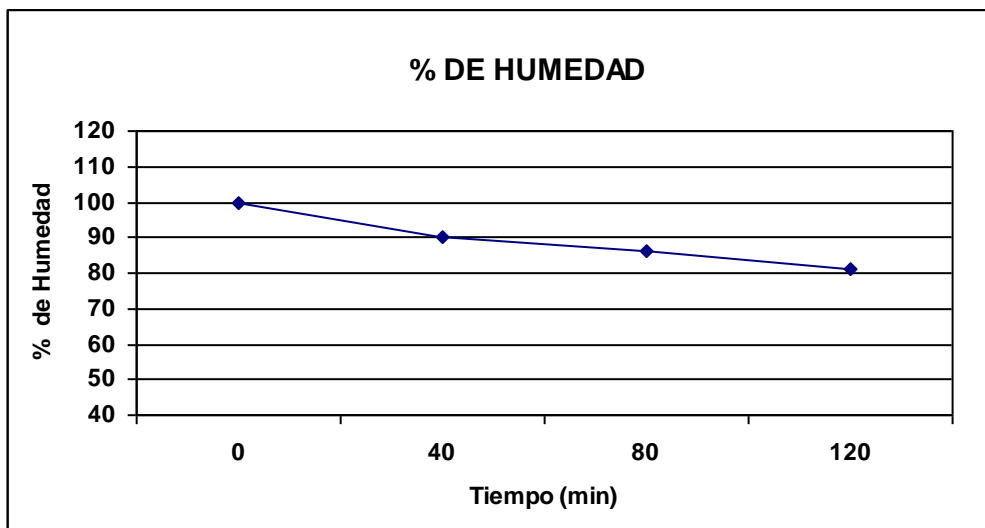
El tiempo de secado de los granos (morochillo), de un saco de 30 kg que es la capacidad del prototipo, es de aproximadamente de 2 horas. Cada 40 minutos se realizó la medición del peso de la carga de los granos, verificando el porcentaje de humedad retirada, como se ilustra en el siguiente cuadro.

**Tabla 6.2** Grado de secado de los granos

<b>t<sub>s</sub> (min)</b>	<b>Masa de la muestra (kg)</b>	<b>% de humedad</b>
0	30	100
40	27,9	90
80	26,4	86
120	24.6	81



**Figura 6.1.** Pérdida de humedad de la muestra



**Figura 6.2.** Pérdida de humedad de la muestra

De acuerdo a la tabla y figuras obtenidas se puede apreciar que durante 2 horas de duración del proceso de secado de los granos se ha obtenido, un porcentaje de 18 % de retiro de humedad, lo que podemos decir que nos encontramos dentro de los parámetros investigados que nos indican que el porcentaje requerido para este tipo de granos es del 14% al 18%.

## CAPITULO 7

# ANÁLISIS ECONOMICO – FINANCIERO

## 7.1 Análisis Económico

En el análisis económico se menciona los costos que incurrieron en el proyecto como son: la materia prima, viajes, insumos, remuneraciones, instalaciones, máquinas y herramientas.

**Tabla 7.1** Aporte de estudiantes

No.	Posición	Valor total
1	Estudiante	300
2	Estudiante	300
<b>Total USD</b>		<b>600</b>

**Tabla 7.2** Honorarios Profesionales

No.	Posición	Valor total
1	Director del proyecto	500
2	Co-director del proyecto	500
<b>Total USD</b>		<b>1000</b>

**Tabla 7.3** Remuneración a no profesionales

No.	Posición	Valor total
1	Soldador	300
	Técnico mecánico	200
<b>Total USD</b>		<b>500</b>

**Tabla 7.4** Misceláneos

Materiales	Valor
Útiles de oficina	100
Transporte	200
Suministros y planos	100
Servicios básicos (eléctricos, agua potable, teléfono, otros)	50
Viáticos y subsistencias	200
Otros gastos de funcionamiento	50
<b>Total USD</b>	<b>700</b>

Total de rubros de ingeniería y administración

**Subtotal 1:**

**2800 USD**

**Tabla 7.5** Costos de materiales para la construcción del secador

Cant	U	Descripción	C. U.	TOTAL
1	U	Ventilador centrifugo	160	160
1	U	Ventilador axial	80	80
2	U	Planchas Acero al carbono ASTM A36 2mm	24	48
4	U	Planchas acero carbono. ASTM A36 1/20"	18	72
10	U	Tubos acero sin cost. de 3"ced 40	15	150
2	U	Planchas de tol negro 1.5 mm	18	36
6	U	Tubos de acero de 1"	25	50
5	Kg	Electrodos E6011-E6013 (kg)	2,5	12,5
1	Glb	Cables de poder	200	200
5	U	Broca HSS de 1/4	2,70	13,50
1	U	Disco de desbaste 7"	4,50	4,50
1	U	Cepillo de acero	3,50	3,50
1	Gal	Pintura para altas temperaturas	80	80
200	U	Pernos 1/4 " x 1"	0,10	20
400	U	Rodelas 1/4	0,01	4
6	U	Lija de agua # 180	0,25	1,50
6	U	Lija de agua # 220	0,25	1,50
6	U	Sierra Sandflex grano grueso	2,00	12
3	Par	Bisagras de 1/4 , para soldar	1	3
2	U	Angulo 1/2" x 1/2" x 6 m	5	10
1	U	Malla de zaranda	6	6
2	Par	Monogafas	1,77	3,54
1	Par	Guantes	3,5	3,5
2	U	Overoles	15	30

**Tabla 7.5** Costos de materiales para la construcción del secador. (Continuación..)

2	U	Faja lumbar talla L	10	20
2	U	Mascarillas 3M, con filtro para Vapores Orgánicos y Ácidos	15	30
2	U	Interruptores 220 V.	5	10
1	Gal	Anticorrosivo	11	11
2	U	Enchufes 110V-200V	2	4
			<b>SUBTOTAL</b>	<b>1080,04</b>
			<b>12 % IVA</b>	<b>129,60</b>
			<b>TOTAL USD</b>	<b>1209,64</b>

**Tabla 7.6** Otros costos directos

No.	Posición	Valor total
1	Instalaciones	100
1	Máquinas y herramientas	200
<b>Total USD</b>		<b>300</b>

Total en materiales y costos directos

**Subtotal 2:** **1509,64 USD**

Para imprevistos se tomo un 10 % de la sumatoria del subtotal 1 y 2.

**Imprevistos:** **430 USD**

Por lo tanto sumando el subtotal 1 y 2 con los imprevistos, el costo final del proyecto es:

**TOTAL GENERAL:** **4.740 USD**

## 7.2 Consumo energético

El secador utilizará cascarilla de arroz como combustible, este material se lo encuentra en las piladoras, como producto de desecho. Por lo que el costo de este combustible no incrementa el costo del proyecto, al contrario contribuye a la no utilización de productos no renovables, como el GLP, que sirve para uso doméstico exclusivamente.

El consumo total eléctrico de los ventiladores utilizados en el proyecto representa 2A, que fueron medidos con un amperímetro. Por lo que podemos calcular el costo aproximado de consumo eléctrico del secador. Hay que tomar en cuenta que los ventiladores son para 110 V, esto nos indica que tendremos un consumo de 220 W.

Las horas de secado por cada carga es de 2.8 horas, por 4 cargas al día, durante 20 días al mes, durante 12 meses al año, nos da un total de 2688 horas al año de operación del secador.

La potencia total de consumo es:

$$P_T = 220 (W) \times 2688 (h)$$

$$P_T = 591360 Wh$$

$$P_T = 591,36 kWh$$

El costo del Kwh en el país para el sector agropecuario campesino es de 0.09 USD.

$$\text{Costo} = 591,36 \frac{kwh}{h} \times 0.09 \text{USD}$$

$$\text{Costo} = 53,22 \text{USD}$$

## 7.3 Análisis financiero

La siguiente tabla indica las fuentes de financiamiento para la ejecución del proyecto.



**Tabla 7.7.** Fuente de Financiamiento

Fuente de Financiamiento	Efectivo USD	% Efectivo	Tiempo USD	% Tiempo	Total USD
CIME ESPE	0	0	300	16	300
EMPRESA PRI.	1640	58	0		1640
DIRECTORES	0	0	1000	52	1000
ESTUDIANTES	1200	42	600	32	1800
<b>TOTALES</b>	<b>2840</b>	<b>100</b>	<b>1900</b>	<b>100</b>	<b>4740</b>

## 7.4 Valor actual neto (VAN) y tasa interna de retorno (TIR)

Para determinar la tasa interna de retorno para el proyecto, se considera una vida útil de 5 años teniendo en cuenta que el secador deberá tener un mantenimiento preventivo, esto podrá incrementar la vida útil del secador por un par de años más

El método uniforme o de línea recta se utilizará para visualizar la depreciación del proyecto.

**Tabla 7.8.** Depreciación del equipo

Depreciación	SECADOR
<b>Tiempo: 5 años</b>	
<b>Vi (Valor inicial)</b>	4740
<b>Vf (Valor final)</b>	1000

La Tasa interna de retorno (TIR) con las fórmulas 7.1 y 7.2 igualando el valor actual neto a cero.

$$VAN = \sum_{i=1}^n \frac{FNC_n}{(1+R)^n} \quad (7.1)$$

$$TIR = VAN = \sum_{i=1}^n \frac{FNC_n}{(1+R)^n} = 0 \quad (7.2)$$

Donde:

VAN = Valor actual neto

FNC = Flujo neto de caja en cada período.

TIR = Tasa interna de retorno

R = Tasa de interés.

**Tabla 7.9** Tabla de ingresos y egresos<sup>32</sup>

INGRESOS	\$	EGRESOS	\$
Ventas <sup>1</sup>	19200	Energía Eléctrica	53,22
		MPD	9200
		MOD	2400
		Depreciación	350
		Mantenimiento	100

**Tabla 7.10** Tabla de ingresos y egresos en 5 años

		Tasa de interés anual (%)		16,1			
Período (años)	INGRESOS \$	EGRESOS \$					TOTAL
	Ventas	Energía	MPD	MOD	Deprec.	Mtto.	
0	0	0	0	0	0	0	0
1	19200	53,22	9200	2400	350	100	12103,22
2	19200	53,22	9200	2400	350	100	12103,22
3	19200	53,22	9200	2400	350	100	12103,22
4	1920	53,22	9200	2400	350	100	12103,22
5	19200	53,22	9200	2400	350	100	12103,22

**a. Cálculo del valor actual neto.**

La tasa de interés anual en fracción es:

$$r = 16.1 \%$$

$I_0 = \$ 4740$  Valor inicial de la inversión

$$VAN := -I_0 + \frac{FNC}{(1+r)^1} + \frac{FNC}{(1+r)^2} + \frac{FNC}{(1+r)^3} + \frac{FNC}{(1+r)^4} + \frac{FNC}{(1+r)^5}$$

$$VAN = 5690$$

**b. Cálculo de la tasa interna de retorno**

<sup>32</sup> Valor del quintal de Morochillo a precio de productor (\$ 10,00)

Dada la ecuación (7.2)

$$0 = -I_0 + \frac{FNC}{(1+r)^1} + \frac{FNC}{(1+r)^2} + \frac{FNC}{(1+r)^3} + \frac{FNC}{(1+r)^4} + \frac{FNC}{(1+r)^5}$$

TIR := Find(r)

TIR = 0.145 → 14.5 % Anual

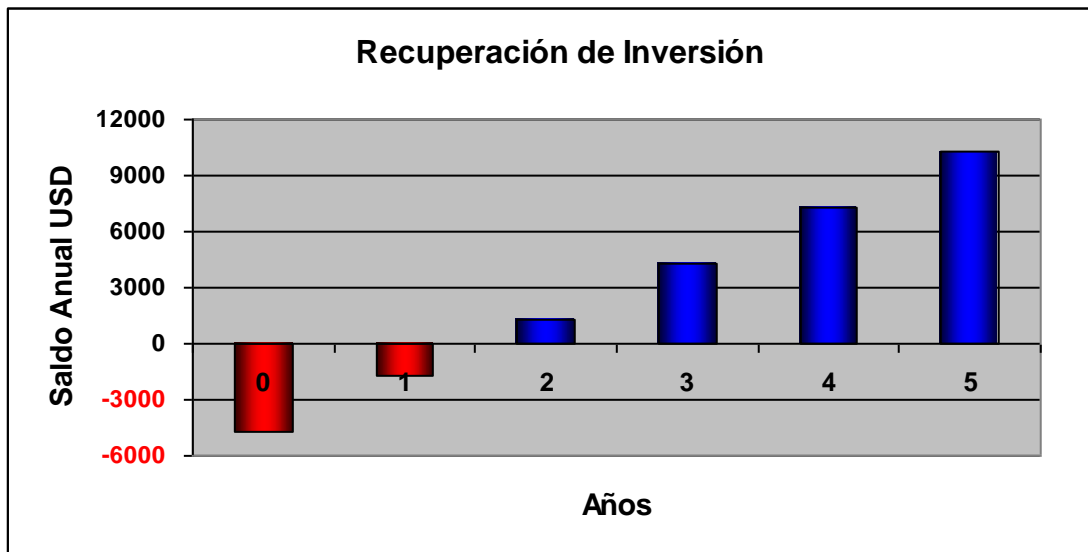
**Tabla 7.11** Tabla de ingresos y egresos en 5 años

Período (años)	INVERSION	FNC	VAN	TIR
0	4740	0	5690	14.5%
1		0	2999	
2		0	2999	
3		0	2999	
4		0	2999	
5		0	2999	

La tasa interna de retorno calculada es del 14,5% anual, esto nos indica que el proyecto es rentable.

## 7.5 Recuperación de la inversión

Siempre que se piense en la recuperación de la inversión es conveniente tomar en cuenta que la misma, se relaciona en forma directa con la vida útil del equipo, como se muestra en el siguiente gráfico:



**Figura 7.1** Recuperación de la inversión

Del gráfico podemos concluir que la inversión se recuperará a partir del segundo año de funcionamiento del secador.

## 7.6 Relación Costo vs. Beneficio

El costo-beneficio es un indicador del rendimiento del proyecto, así que podemos indicarlo en la siguiente tabla:

**Tabla 7.12** Tabla de Costo – Beneficio

Período (años)	COSTO (USD)	SALDO (USD)
0	-4740,00	-4740,00
1		-1741,00
2		1258,00
3		4257,00
4		7256,00
5		<b>10255,00</b>

$$\text{Costo/Beneficio} = \frac{4740}{4740 + 10255}$$

$$\text{Costo/Beneficio} = 0.3161 = 31.61\%$$

El 31,61% refleja que el beneficio supera al costo, indicándonos la rentabilidad del proyecto.

## CAPITULO 8

# CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

## 8.1 CONCLUSIONES

- La humedad del morochillo que se empleo durante la prueba del equipo disminuyo de 22 % al 13% después del proceso de secado.
- Para optimizar el tiempo de secado hay que tomar muy en cuenta 2 factores importantes:
  - Las condiciones iniciales (del medio) y el origen del producto (humedad)
  - La altura del producto (granos) que será colocado en la cámara de secado
- Se emplea desecho vegetal como combustible para la cámara de combustión, para nuestro caso fue la cascarilla de arroz, esto contribuye a no emplear gas doméstico (GLP).
- El costo para secar 1000 saquillos de morochillo con GLP sería de 200 dólares, este sería un ahorro directo al empelar la cascarilla de arroz como combustible.
- Se dejaría de emplear para el caso anterior 125 tanques de 14 Kg. de gas doméstico y que es subsidiado por el estado

## 8.2 RECOMENDACIONES

- Se propone analizar el empleo de otros desechos vegetales como la tagua y la tusa del choclo ya que durante la investigación del proyecto se pudo observar que estos desechos contienen un poder calorífico alto y benefician a mantener la llama de combustión.

- Para mejorar el secado de los granos se recomienda colocar un sistema de movimiento (giratorio o de vibración). Esto ayudaría a que todos los granos se encuentren en contacto con el aire caliente en la Cámara de secado.
- Se debería analizar las diferentes formas geométricas que puede tener la cámara de secado como por ejemplo de forma cilíndrica, esto beneficiaría para mover el producto y tener un secado uniforme.
- Para mejorar el ingreso de cascarilla hacia la cámara de combustión y retirar la ceniza producto de la combustión se podría implementar sistemas mecánicos para estos dos casos, como tornillos sinfín o bandas transportadoras.



## BIBLIOGRAFIA

1. Singh Paúl, Heldman Dennis, Introducción a la Ingeniería de Alimentos, Acribia S. A., 1998
2. Mott Robert, Mecánica de Fluido Aplicada, Prentice Hall, 1996
3. Incropera Frank, David Dewitt, Fundamentos de Transferencia de Calor, Prentice Hall, 1999
4. Cengel Yunus, Dr. Boles A., Termodinámica, Mc Graw-Hill
5. Marter Donald, Termodinámica y Motores Térmicos, UTEHA, 1988
6. Salvi Giuliano, La Combustión Teoría y Aplicaciones, Dossat S. A.
7. Pitts Donald, Leighton Sissom, Teoría y Problemas de Transferencia de Calor, Mc Graw Hill, 1980
8. Hreith F., Black, W. Transferencia de Calor principios fundamentales, Alambra, 1983.
9. Marcal Daniel, Marques José, Principios de secado de granos psicometría higroscopia, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), 1991
10. Cifuentes César, Manual técnico de sericultura, Fondo Editorial de Risaralda, 1998
11. Trinks W., M. Mawhinney, Hornos Industriales I, II Urmo S. A, 1975
12. De Dios, C. A., Secado de granos y secadoras. Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe. Santiago, Serie Tecnología Postcosecha, 1996.
13. Perry, R, Manual del Ingeniero Químico, Tomo V, 6ta ed, México. McGraw-Hill, 1997.
14. Treybal, R, Operaciones de Transferencia de Masa, México, McGraw-Hill, 1990.

## DIRECCIONES DE INTERNET

- <http://www.siga.gov.ec/arroz.htm> "Estadísticas de producción anual de arroz de los últimos 10 años"
- <http://www.fao.org/manejodegranosposcosecha.htm> Principios de secado de granos poscosecha.
- <http://www.fao.org/secadodegranos.htm> Principios de secado de granos.



## REVISTAS

- Revista del Centro Interamericano de Artesanías y Artes Populares (CIDAP)  
"Artesanías de América".

# **ANEXOS**

ANEXO A:

## **FOTOGRAFÍAS**

**ANEXO B:**

## **PLANOS**

**ANEXO C:**

## **DIAGRAMA DE OPERACIONES**

ANEXO D:

## **DIAGRAMA DE PROCESOS**

## **ANEXO E:**

### **CATÁLOGOS**

D1: MOTT, Robert, Mecânica de Flúidos. Constantes para cálculo de perdidas

D2: Prontuário de materiais, Propiedades de láminas de acero y tubería

D3: INAMHI, Propiedades del ambiente de la zona de Ventanas.

D4: SIGA, Datos estadísticos de la producción arroz, desde 1991 al 2006

D5: RAYTEK, Termómetro láser sin contacto.

D6: BARRY, Ventiladores sus propiedades y curvas.

D7: ASTEVA, Tubería de cobre y Acero inoxidable, propiedades

D8: AISLANTES, Descripción y aplicaciones

### **FOTOGRAFÍAS DEL EQUIPO**

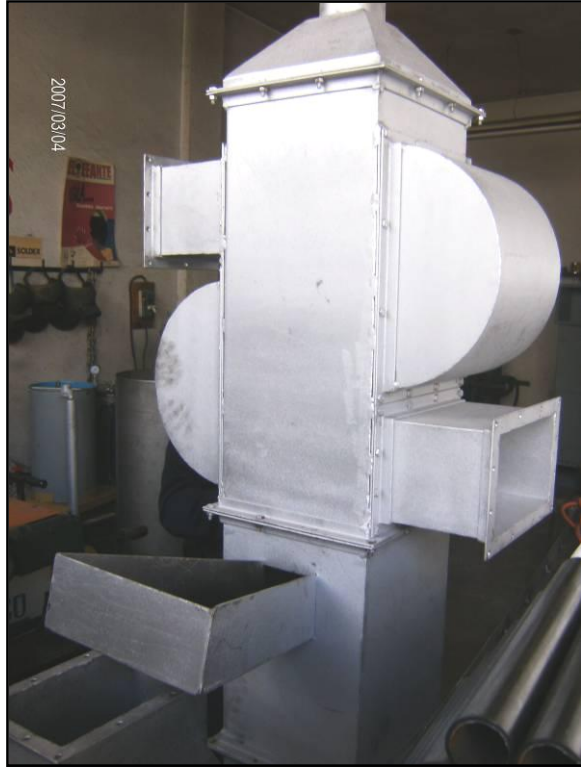


**Fotografía 1.** Cámara de combustión

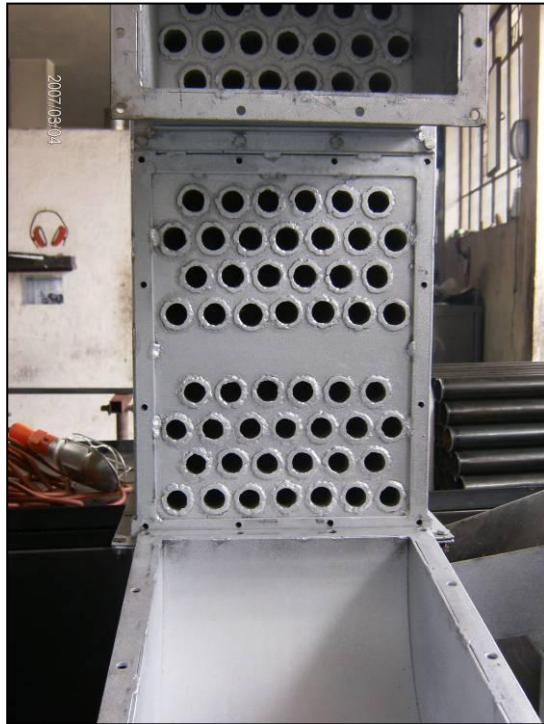


**Fotografía 2.** Intercambiador de Calor





**Fotografía 3.** Módulo de combustión e Intercambiador



**Fotografía 4.** Partes con bridas de ángulo.



**Fotografía 5.** Cámara de secado



**Fotografía 6.** Conjunto Secador Armado