

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO PARA SECADO DE ARROZ AL VACÍO CON CAPACIDAD DE CINCO KILOGRAMOS DE ARROZ CON CÁSCARA

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

**LUIS RICARDO ALMACHE AVENDAÑO
PABLO FERNANDO GALLEGOS COSTALES**

DIRECTOR: ING. JOSÉ GUASUMBA CODENA

CODIRECTOR: ING. JUAN PABLO ALCOSER

Sangolquí, 2006 – Agosto - 01

CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO

El proyecto “DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN PROTOTIPO PARA SECADO DE ARROZ AL VACÍO CON CAPACIDAD DE CINCO KILOGRAMOS DE ARROZ CON CÁSCARA” fue realizado en su totalidad por Luis Ricardo Almache Avendaño y Pablo Fernando Gallegos Costales, como requerimiento parcial para la obtención del título de Ingeniero Mecánico.

**Ing. José Guasumba C.
DIRECTOR**

**Ing. Juan Pablo Alcoser
CODIRECTOR**

Sangolquí, 06-08-01

LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO

**“DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN PROTOTIPO PARA SECADO DE
ARROZ AL VACÍO CON CAPACIDAD DE CINCO KILOGRAMOS DE ARROZ
CON CÁSCARA”**

ELABORADO POR:

Ricardo Almache A.

Pablo Gallegos C.

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

Mayo. Edgar Pazmiño

Sangolquí, 06-08-01

DEDICATORIA

A todos aquellos seres que me han brindado su apoyo durante esta etapa y que han estado presentes para permitirme culminar en este paso trascendental de mi vida, en especial a mis padres que me han brindado la herencia más valiosa que puedo tener como es la educación.

Ricardo Almache A.

A todas aquellas personas que siempre han estado presentes en cada uno de los pasos que me han llevado a culminar con éxito un peldaño más en el largo camino de la vida, en especial a mis padres y mi abuela que han sido una inspiración de coraje, empuje y superación.

A la Madre Dolorosa a la que fui encomendado y la que ha sido una guía espiritual en los momentos más difíciles de mi vida.

Pablo Gallegos C.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la fuerza de amor presente en todo lo que nos rodea y que llamo Dios por concederme todas las herramientas necesarias para comprender y utilizar este conocimiento para beneficio de todos; un especial agradecimiento a mi familia por brindarme su apoyo durante estas etapas de mi vida siempre demostrándome con su ejemplo valores como: perseverancia, superación y comprensión; un gran agradecimiento a las personas que he conocido en el trayecto de mi vida cuya guía y presencia han estado presentes en esos momentos especiales y que llamo amigos.

Agradezco a quienes han permitido el desarrollo de esta Tesis compartiendo su conocimiento y experiencias, en especial al Director y Codirector de este proyecto, que con su apoyo fue posible desarrollar este documento.

Ricardo Almache A.

Agradezco a Dios por concederme el don de la vida y el entendimiento para permitirme culminar con éxito esta etapa mi vida.

A mis padres y toda mi familia, quienes han sido la base y puntal fundamental del éxito conseguido.

A todas aquellas personas que siempre me han empujado a seguir adelante y que han compartido conmigo alegrías y tristezas a todo lo largo de la vida estudiantil y que más que mis compañeros han sido "Amigos".

Un agradecimiento especial al Director y Codirector sin quienes no hubiera sido posible concluir de forma satisfactoria el presente proyecto.

Pablo Gallegos C.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CONTENIDO	PAG
CERTIFICACIÓN DE ELABORACIÓN DEL PROYECTO	II
LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO	III
DEDICATORIA	IV
AGRADECIMIENTOS	V
INDICE DE CONTENIDOS	VI
RESUMEN	XVIII
CAPITULO 1: GENERALIDADES	
1.1 Antecedentes	1
1.2 Definición del Problema	4
1.2.1 Pérdidas generadas en la poscosecha	4
1.2.2 Factores que afectan la conservación del grano	5
1.2.2.1 Factores que afectan la poscosecha	6
1.3 Objetivo General	7
1.4 Objetivos Específicos	7
1.5 Alcance	8
1.6 Justificación	8
CAPITULO 2: SISTEMAS DE SECADO DE ARROZ	
2.1 Caracterización del Arroz	11
2.1.1 Partes de la planta de arroz	11
2.1.2 Etapas del crecimiento y desarrollo de la planta de arroz	13

2.1.3	Características de las zonas de cultivo	14	
2.1.4	Variedades de arroz en el Ecuador	15	
2.1.5	Siembra		16
2.1.5.1	Sistemas de Siembra	16	
2.2	Tecnologías de secado		18
2.2.1	Psicrometría	18	
2.2.1.1	Aire atmosférico		19
2.2.1.2	Gráfico psicrométrico	23	
2.2.1.3	Humedad relativa y déficit de presión de vapor	25	
2.2.2	Higroscopía	26	
2.2.2.1	Fenómeno de "sorción"	27	
2.2.2.2	Modelos de equilibrio higroscópico	32	
2.2.2.3	Entalpía de vaporización		36
2.2.3	Sistemas de Secado	38	
2.2.4	Fuentes de Energía	49	
2.2.4.1	Combustibles		49
2.2.4.2	Combustión	51	
2.3	Sistema Adecuado de Trabajo	53	
2.3.1	Aplicaciones prácticas del vacío	54	
2.3.2	Clasificación de las Bombas de Vacío	54	2.3.2.1
	Parámetros y Clasificación de las Bombas de Vacío	55	
2.3.3	Dispositivos de Medición de Vacío	56	
2.3.4	Comportamiento de los materiales en el vacío	57	
2.3.5	Esquema del sistema de secado	63	
2.3.5.1	Descripción del Proceso de Secado al Vacío	64	
2.3.6	Comportamiento de las moléculas bajo efectos del vacío	66	

CAPITULO 3: DISEÑO TERMODINÁMICO DEL SISTEMA DE SECADO

3.1	Determinación de Parámetros del Proceso de Secado.	67	
3.1.1	Rango de presión de vacío ideal de operación	68	
3.1.2	Rango de temperatura adecuada de trabajo	69	
3.1.3	Otros Factores		69
3.2	Comparación de los mecanismos de transferencia de calor	71	
3.3	Diseño del sistema de transferencia de calor adecuado a los requerimientos		

3.3.1	Datos iniciales de diseño	73	
3.3.2	Cálculo de la energía necesaria para vaporización	74	
3.3.3	Cálculo de transferencia de calor	76	
3.4	Cálculo de Parámetros Dimensionales	84	
3.4.1	Determinación de la longitud de tubo para la transferencia de calor		84
3.4.2	Dimensiones de las bandejas	88	
CAPITULO 4: DISEÑO DEL RECIPIENTE DE VACÍO			
4.1	Normas De Diseño	93	
4.1.1	Introducción al Código		93
4.1.1.1	Orígenes y políticas básicas	93	
4.1.1.2	Historia de los Códigos de construcción, referencia e inspección		94
4.1.1.3	Organización de ASME Sec. VIII, Div. 1 Recipientes a Presión	95	
4.1.1.4	Definiciones Generales	95	
4.1.1.5	El proceso de revisión del Código	96	
4.1.1.6	Prefacio		97
4.1.1.7	Alcance de ASME Sec. VIII y responsabilidades	98	
4.1.2	Materiales	101	
4.1.2.1	Selección de materiales para unidades de proceso	102	
4.1.2.2	Requerimientos para las propiedades de los materiales		102
4.1.2.3	Clasificación, designación y aplicación	103	
4.1.2.4	Agrupaciones de los materiales	105	
4.2	Determinación de Cargas de Diseño	106	
4.2.1	Temperatura de Diseño	106	
4.2.1.1	Temperatura máxima de diseño	106	
4.2.1.1	Temperatura mínima de diseño	107	
4.2.2	Presión de Diseño	107	
4.3	Cálculo de Parámetros Dimensionales	109	
4.3.1	Determinación del diámetro interior y longitud del cuerpo del recipiente	109	
4.3.2	Determinación del espesor del cuerpo y cabezas	110	

4.3.2.1	Espesor del Cuerpo	110
4.3.2.2	Espesor de cabezas	114
4.3.3	Determinación de bocas	120
4.3.3.1	Refuerzos de las aberturas	121
4.3.4	Determinación de la unión cuerpo – cabeza	123
4.4	Selección de la Bomba de Vacío	127

CAPITULO 5: CONSTRUCCION DEL MODELO

5.1	Construcción de partes y piezas	133
5.1.1	Conformar cuerpo cilíndrico y cabezas	133
5.1.2	Elaborar bridas y sello	134
5.1.3	Elaborar bandejas	134
5.1.4	Elaborar sillas	135
5.1.5	Construir flejes metálicos de la unidad de calentamiento	136
5.1.6	Construir tapas con aislamiento	136
5.1.7	Construir flautas	137
5.1.8	Construir orejas de fijación del quemador	137
5.1.9	Construir flejes de fijación del quemador	138
5.2	Ensamble de sistemas y subsistemas	138
5.2.1	Elaborar sistema de cobre	138
5.2.2	Construir recipiente con bocas y sellos	139
5.2.3	Construir cámara de secado	140
5.2.4	Construir mesa de soporte	141
5.2.5	Construir unidades de calentamiento	142
5.2.6	Construir quemadores	143
5.2.7	Ensamble total	144
5.3	Conexión de acoples y accesorios	145
5.4	Montaje	146

CAPITULO 6: ENSAYOS DEL PROTOTIPO

6.1	Protocolo de pruebas		147
6.1.1	Comprobación de parámetros de la bomba de vacío	147	
6.1.2	Determinación del consumo de gas en el proceso	150	
6.1.3	Determinación de la humedad final del grano		155
6.1.4	Inspección del producto final obtenido		160
6.1.5	Pruebas análogas en una muestra de control		165
6.2	Análisis de resultados		168
6.2.1	Comparación entre el método de secado al vacío y el método tradicional		168
6.2.2	Cálculo de la eficiencia total del sistema de secado al vacío		169

CAPITULO 7: MANUAL DE OPERACIÓN

7.1	Especificaciones técnicas de operación		171
7.2	Condiciones de operación		178
7.3	Manual de mantenimiento		179
7.3.1	Manuales de mantenimiento		180

CAPITULO 8: EVALUACIÓN ECONÓMICA FINANCIERA

8.1	Análisis económico		189
8.1.1	Ingresos		189
8.1.1.1	Ingresos por alquiler de la máquina		189
8.1.1.2	Ingresos por venta de prototipos		190
8.1.1.3	Ingresos por Seminarios y Cursos		190
8.1.1.4	Asesoría de Proyectos		190
8.1.1.5	Venta de Diseños		191
8.1.2	Costos		191
8.1.2.1	Costos por motivo de ingresos		191
8.1.2.2	Costos Indirectos		192
8.1.2.3	Costos Directos		193

8.2	Flujo de capital	196
8.3	Flujo de fondos	197

CAPITULO 9: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		199
--	--	-----

TABLAS

Tabla 1.1	Aplicaciones de las técnicas de vacío	3
Tabla 2.1	Las nueve etapas de crecimiento de la planta de arroz	14
Tabla 2.2	Propiedades termodinámicas del aire húmedo definidas en un punto de estado	24
Tabla 2.3	Presión Barométrica (mbar) a diferentes alturas	25
Tabla 2.4	Parámetros de la ecuación de Henderson modificada, respecto de diversos productos	34
Tabla 2.5	Parámetros de la ecuación de Chung-Pfost respecto de diversos productos	35
Tabla 2.6	Parámetros a y b de la ec. (2.11) respecto de diversos productos	37
Tabla 2.7	Poder calorífero Inferior (Hi) de algunos combustibles por metro cúbico en condiciones normales de temperatura y presión	50
Tabla 2.8	Temperaturas de ignición al nivel del mar	52
Tabla 2.9	Historia de las bombas de vacío	54
Tabla 2.10	Descripción del flujo	63
Tabla 2.11	Descripción de las partes del Prototipo	64
Tabla 3.1	Propiedades Termodinámicas del Agua	74
Tabla 3.2	Propiedades Termofísicas del Agua	79
Tabla 3.3	Longitud requerida en función de la temperatura de la placa	85
Tabla 3.4	Dimensiones finales de las bandejas	91
Tabla 4.1	Descripción de bocas	120
Tabla 4.2	Características de la bomba de vacío seleccionada	131
Tabla 5.1	Conexión de acoples y accesorios	145
Tabla 5.2	Montaje	146
Tabla 6.1	Propiedades del GLP	153
Tabla 6.2	Propiedades iniciales del arroz	159

Tabla 6.3	Características técnicas del medidor de humedad	159
Tabla 6.4	Comparación de parámetros entre sistemas de secado	168
Tabla 7.1	Condiciones de operación del Sistema de Secado	178
Tabla 7.2	Plan de Mantenimiento del Sistema de Secado de arroz al Vacío	179
Tabla 8.1	Ingresos por Alquiler de la Máquina	189
Tabla 8.2	Ingresos por Venta de Prototipos	190
Tabla 8.3	Ingresos por Seminarios y Cursos	190
Tabla 8.4	Ingresos por Asesoría de Proyectos	190
Tabla 8.5	Ingresos por Venta de Diseños	191
Tabla 8.6	Costos por mantenimiento de la máquina	191
Tabla 8.7	Costos por desarrollo de Seminarios y Cursos	191
Tabla 8.8	Costos por Asesoría de Proyectos	192
Tabla 8.9	Costos por Venta de Diseños	192
Tabla 8.10	Mano de Obra Indirecta	192
Tabla 8.11	Material Indirecto	192
Tabla 8.12	Costo de Mantenimiento en el año de inversión	192
Tabla 8.13	Mano de Obra Directa	193
Tabla 8.14	Quemador	193
Tabla 8.15	Unidades de Calentamiento	193
Tabla 8.16	Tuberías y Acoples	194
Tabla 8.17	Materia Prima Directa	195
Tabla 8.18	Costo de Producción por máquina a partir del primer año	195
Tabla 8.19	Costos de fabricación	196
Tabla 8.20	Costos de producción	196

FIGURAS

Figura 1.1	Factores que afectan la poscosecha	6
Figura 2.1	Semilla en Germinación	11
Figura 2.2	Partes vegetativas	12
Figura 2.3	Partes del cariósido de arroz (grano o semilla)	12
Figura 2.4	Partes de una panoja	13
Figura 2.5	Esquema de un psicrómetro con sistema de	

aspiración de aire	22
Figura 2.6 Gráfico Psicrométrico, Presión Atmosférica 101.325 KPa	23
Figura 2.7 Gráficos Psicrométricos que representan las propiedades del aire	24
Figura 2.8 Presiones parciales del vapor de agua en el aire P_v y en la superficie del grano P_{vg}	29
Figura 2.9. Gráfico de Isotermas de sorción a diferentes temperaturas	31
Figura 2.10 Esquema del secador de lecho fijo	39
Figura 2.11 Esquema de distribución de canaletas paralelas en secadores de tipo cascada	42
Figura 2.12 Esquema de distribución de canaletas en un secador de canaletas cruzadas (KREYGER 1972)	42
Figura 2.13 Esquemas de secadores de flujos cruzados de tipo torre	43
Figura 2.14 Esquema de secador de flujos paralelos.	45
Figura 2.15 Secado en flujos contrarios, en silos	46
Figura 2.16 Esquema de un secador intermitente de flujos cruzados	48
Figura 2.17 Sección transversal esquemática de un sistema industrial de vacío	55
Figura 2.18 Rangos de presión para bomba de vacío	56
Figura 2.19 Intervalos de presión en los medidores de vacío	57
Figura 2.20 Esquema de procesos elementales durante las interacciones gas-superficie	58
Figura 2.21 Esquema del Prototipo de Secado de arroz al Vacío	63
Figura 2.22 Esquema del Secado con tecnología de Vacío	66
Figura 3.1 Espesor de la placa de acero a utilizarse	76
Figura 3.2 Corte de tubería de cobre Tipo L	77
Figura 3.3 Esquema unión placa tubo	77
Figura 3.4 Analogía de resistencias para la transferencia de calor	81
Figura 3.5 Gráfico $L = f(T_p)$	86
Figura 3.6 Esquema de la distribución de la capa de arroz	89
Figura 4.1 Esquema de distribución de bandejas y tubería	109
Figura 4.2 Esquema de distribución de bocas del recipiente (Vista Lateral)	110
Figura 4.3 Disposición de bocas en el recipiente	120
Figura 4.4 Despliegue de bocas en el cuerpo cilíndrico	121
Figura 4.5 Esquema de la unión cuerpo – cabeza	124
Figura 4.6 Esquema de la junta empernada	125

Figura 4.7 Efecto de la presión de vacío en la junta	126
Figura 4.8 Dimensiones del anillo	127
Figura 6.1 Pesaje del cilindro previo al proceso	150
Figura 6.2 Sellado del recipiente de vacío	151
Figura 6.3 Encendido de la bomba de vacío	151
Figura 6.4 Control de los parámetros de operación (presión y temperatura)	152
Figura 6.5 Pesaje del cilindro posterior al proceso	153
Figura 6.6 Pesaje de las muestras	156
Figura 6.7 Ubicación de bandejas en el recipiente	157
Figura 6.8 Muestras extraídas del recipiente posterior al proceso de secado	157
Figura 6.9 Pesaje de la muestra posterior al proceso de secado	158
Figura 6.10 Muestra de arroz posterior al proceso de secado	158
Figura 6.11 Separación de impurezas de la muestra	162
Figura 6.12 Porcentaje de impurezas de la muestra	163
Figura 6.13 Muestra de Arroz secada por método tradicional	166
Figura 6.14 Porcentaje de impurezas de la muestra secada por métodos tradicionales	167
Figura 6.15 Comparación entre el método de secado al vacío vs método tradicional	168
Figura 6.16 Diagrama de Sankey del balance de energía del sistema de secado	170

ANEXOS

ANEXO A: Lista de Símbolos	205
ANEXO B: Variedades de Arroz	209
ANEXO C: Sistemas Tradicionales de Secado	221
ANEXO D: Bombas de vacío	225
ANEXO E: Tablas de Tubería de Cobre	235
ANEXO F: Propiedades termo físicas de materiales	239
ANEXO G: Factores de eficiencia de aletas	247

ANEXO H: Propiedades del material SA 36	253
ANEXO I: Diseño de cuerpos y cabezas bajo presión externa	257
ANEXO J: Gráficos de diseño bajo presión externa	263
ANEXO K: Fotografías de construcción del prototipo	271
ANEXO L: Formatos de Hojas de Informe del protocolo de pruebas	275
ANEXO M: Formatos de Hojas de Informe del protocolo de pruebas para el laboratorio de Energías no Convencionales FIME – ESPE	283
ANEXO N: Características técnicas de los equipos e instrumentos utilizados	293
ANEXO O: Carta de Satisfacción	303

RESUMEN

La alta estacionalidad del cultivo de arroz (pico de cosecha), el manejo inadecuado de inventarios, sumado a la escasez de recursos para: siembra, gastos de cosecha, secado, almacenamiento y comercialización, generan una alta tasa de pérdida, es por esta razón que se hace necesaria una estructuración de medidas correctivas a mediano y largo plazo para el mejoramiento del manejo de los productos en sus respectivas etapas de pre y poscosecha, mediante la implementación de nuevas tecnologías.

El secado de grano, la preparación como limpieza y selección del mismo, es muy importante para el éxito de cualquier método de almacenamiento. Debido a que los procesos vitales ocurren en forma muy lenta cuando hay poca humedad, el grano bien secado no se deteriora.

Este estudio trata sobre la teoría de la humedad, temperatura en el aire y la del grano, la humedad relativa y sus interacciones recíprocas; además se da una explicación de los niveles seguros de la humedad del grano y de investigación de la tecnología del secado al vacío.

Es por esto que se ha visto la necesidad de crear un proyecto que ayude a mejorar la calidad del arroz existente en su índice de humedad, mediante la aplicación del método de Tecnología de secado al vacío de Baja Densidad Molecular con Remoción de Gases Ocluidos o Disueltos, ya que esto significa una mejora en el producto, incrementando su competitividad y valor en el mercado lo que conlleva finalmente a mejorar la condición socio – económica tanto a nivel de productor como consumidor.

La tecnología de vacío permite alcanzar rangos de presión menor que la atmosférica lo que brinda la ventaja de disminuir las temperaturas de operación en el proceso de secado ya que a una menor presión se reduce la temperatura de vaporización del agua contenida en el grano lo que implica un menor ingreso de energía y por tanto una reducción del consumo de combustible y por ende conlleva un ahorro económico, además este sistema permite crear un ambiente controlado de operación, reduciendo los tiempos de secado y optimizando el proceso.

En este tipo de tecnología la transferencia de calor y pérdidas por convección son mínimas, frente al flujo de calor por conducción o radiación, razón por la cual se ha escogido el mecanismo de transferencia de calor por conducción por las facilidades constructivas y bajo costo frente al uso de sistemas de radiación que implica elevados costos y alta disponibilidad de tecnología.

Para el diseño y construcción del recipiente se escogió las normas contenidas en el código ASME Sección VIII, División 1, ya que ahí se encuentran las reglas de diseño, construcción e inspección para recipientes sometidos a las condiciones requeridas de presión externa y hermeticidad del recipiente.

De los resultados obtenidos mediante este proceso, con pruebas realizadas, se obtuvo un arroz con humedad final del 11.3 % a partir de un grano con humedad inicial del 19.7 % durante un lapso de dos horas, con bajo consumo de combustible, consiguiendo los parámetros requeridos para manejo poscosecha del producto.

Además el bajo consumo de combustible (GLP) es debido a que en el sistema de calentamiento se utilizó un mecanismo de recirculación del agua y se reducen las pérdidas por las ventajas indicadas anteriormente sobre el uso de esta tecnología.

Finalmente mediante la experimentación con esta técnica de secado se pudo comprobar que se consigue el parámetro de humedad requerido en el menor tiempo y con bajo consumo de combustible frente a tecnologías tradicionales existentes, por tanto es una alternativa viable que podría ser implementada en nuestro medio con las respectivas ventajas competitivas.

REFERENCIAS

BIBLIOGRÁFICAS

1. MARQUES PEREIRA, José y MARCAL DE QUEIROZ, Daniel. Principios de secado de granos psicrometría higroscopía. Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe. Santiago, Chile. 1991.67p.

2. DALPASQUALE, Valdecir. et al. Secado de granos a altas temperaturas. Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe. Santiago, Chile. 1991.75p.
3. KERN, Donald. Procesos de transferencia de calor. Traducido del inglés por Ing. Nicolás Marino Ambrossi. 26ta. ed. México. Compañía Editorial Continental.1995. pp 13 – 85, pp 898 – 905.
4. INCROPERA, Frank P. Fundamentos de transferencia de calor y masa. 4ta ed. New York. John Wiley and Sons. 1996.
5. MOTT Robert L. Mecánica de fluidos aplicada. Traducido del inglés por Carlos Roberto Cordero Pedraza. 4ta ed. México. Prentice – Hall. 1996. pp 43 – 46.

INFORMACION MAGNÉTICA

1. CD. Pressure Vessel Handbook. 12da ed. Pressure Vessel Publishig.

INTERNET

1. <http://www.svc.org/>. Guías educativas de tecnología al vacío.
2. <http://omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/html/fisica.html>. Tecnología de vacío.
3. http://www.usvacuumpumps.com/espanol/definicion_del_vacio.html. Definición del vacío.

4. <http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4070035/index.html>. Transferencia de calor.
5. <http://www.fao.org/docrep/X5027S/x5027S04.HTM#Métodos%20de%20limpieza>. Manual de manejo postcosecha.
6. http://www.sica.gov.ec/cadenas/arroz/docs/panorama_arroz_ecuador2.html. La agricultura en el Ecuador.
7. <http://www.sica.gov.ec/cadenas/arroz/docs/actores.htm>. Sectores arroceros del Ecuador.
8. <http://www.fao.org/docrep/x5059S/x5059S00.htm#Contents>. Secado de granos a altas temperaturas.
9. <http://www.fao.org/docrep/X5057S/x5057S00.htm#Contents>. Psicrometría Higroscopía.
10. http://www.conae.gob.mx/wb/CONAE/CONA_1781_caso_exitoso_3_la_ve. Diagramas de Sankey.

RESUMEN

La alta estacionalidad del cultivo de arroz (pico de cosecha), el manejo inadecuado de inventarios, sumado a la escasez de recursos para: siembra, gastos de cosecha, secado, almacenamiento y comercialización, generan una alta tasa de pérdida, es por esta razón que se hace necesaria una estructuración de medidas correctivas a mediano y largo plazo para el mejoramiento del manejo de los productos en sus respectivas etapas de pre y poscosecha, mediante la implementación de nuevas tecnologías.

El secado de grano, la preparación como limpieza y selección del mismo, es muy importante para el éxito de cualquier método de almacenamiento. Debido a que los procesos vitales ocurren en forma muy lenta cuando hay poca humedad, el grano bien secado no se deteriora.

Este estudio trata sobre la teoría de la humedad, temperatura en el aire y la del grano, la humedad relativa y sus interacciones recíprocas; además se da una explicación de los niveles seguros de la humedad del grano y de investigación de la tecnología del secado al vacío.

Es por esto que se ha visto la necesidad de crear un proyecto que ayude a mejorar la calidad del arroz existente en su índice de humedad, mediante la aplicación del método de Tecnología de secado al vacío de Baja Densidad Molecular con Remoción de Gases Ocluidos o Disueltos, ya que esto significa una mejora en el producto, incrementando su competitividad y valor en el mercado lo que conlleva finalmente a mejorar la condición socio – económica tanto a nivel de productor como consumidor.

La tecnología de vacío permite alcanzar rangos de presión menor que la atmosférica lo que brinda la ventaja de disminuir las temperaturas de operación en el proceso de secado ya que a una menor presión se reduce la temperatura de vaporización del agua contenida en el grano lo que implica un menor ingreso de energía y por tanto una reducción del consumo de combustible y por ende conlleva un ahorro económico, además este sistema permite crear un ambiente controlado de operación, reduciendo los tiempos de secado y optimizando el proceso.

En este tipo de tecnología la transferencia de calor y pérdidas por convección son mínimas, frente al flujo de calor por conducción o radiación, razón por la cual se ha escogido el mecanismo de transferencia de calor por conducción por las facilidades constructivas y bajo costo frente al uso de sistemas de radiación que implica elevados costos y alta disponibilidad de tecnología.

Para el diseño y construcción del recipiente se escogió las normas contenidas en el código ASME Sección VIII, División 1, ya que ahí se encuentran las reglas de diseño, construcción e inspección para recipientes sometidos a las condiciones requeridas de presión externa y hermeticidad del recipiente.

De los resultados obtenidos mediante este proceso, con pruebas realizadas, se obtuvo un arroz con humedad final del 11.3 % a partir de un grano con humedad inicial del 19.7 % durante un lapso de dos horas, con bajo consumo de combustible, consiguiendo los parámetros requeridos para manejo poscosecha del producto.

Además el bajo consumo de combustible (GLP) es debido a que en el sistema de calentamiento se utilizó un mecanismo de recirculación del agua y se reducen las pérdidas por las ventajas indicadas anteriormente sobre el uso de esta tecnología.

Finalmente mediante la experimentación con esta técnica de secado se pudo comprobar que se consigue el parámetro de humedad requerido en el menor tiempo y con bajo consumo de combustible frente a tecnologías tradicionales existentes, por tanto es una alternativa viable que podría ser implementada en nuestro medio con las respectivas ventajas competitivas.

CAPITULO 1

1. GENERALIDADES

1.7 ANTECEDENTES

La alta estacionalidad del cultivo de arroz (pico de cosecha), el manejo inadecuado de inventarios, sumado a la escasez de recursos para: siembra, gastos de cosecha, secado, almacenamiento y comercialización, han generado una sensible baja en el nivel de precios, provocando convulsión social manifestada en acciones de hecho tales como paro de actividades, bloqueo de carreteras, etc.

En el mes de Mayo del 2004, el Gobierno Nacional tuvo que enfrentar un paro protagonizado por organizaciones campesinas y productores del Litoral, quienes exigían al Ministerio de Agricultura y Ganadería, fijase un precio oficial de la gramínea de 18 dólares por quintal.

El paro concluyó una vez que el señor Ministro de Agricultura y Ganadería, Ing. Galo Plaza Pallares junto a dirigentes del sector arrocero llegaron a un acuerdo mediante el cual se contemplaba la reapertura de los silos de ENAC¹ para que recepten arroz a un valor referencial de 14,50 dólares la saca de 200 libras en cáscara con 20% de humedad y 5 % de impurezas, aclarando que no significaba la fijación de un precio oficial ya que este dependía de las leyes de oferta y demanda que regulan el mercado; el valor referencial se estableció para los créditos de movilización del BNF², contra garantía del arroz depositado en ENAC.

¹ ENAC : Empresa Nacional de Almacenamiento y Comercialización

² BNF: Banco Nacional de Fomento

Estas acciones ayudaron a detener la caída abrupta en el nivel de precios (9 y 10 dólares por quintal de arroz pilado), sin embargo no solucionaron los problemas que afectan al sector arrocero, ya que ello no depende de un esfuerzo coyuntural sino más bien de una estructuración de medidas correctivas a mediano y largo plazo; tales como el mejoramiento del manejo de los productos en sus respectivas etapas de pre y poscosecha, mediante la implementación de nuevas tecnologías.

El secado de grano, la preparación como limpieza y selección del mismo, es muy importante para guardarlo y para el éxito de cualquier método de almacenamiento. Debido a que los procesos vitales ocurren en forma muy lenta cuando hay poca humedad, el grano bien secado no se deteriora.

Este estudio trata sobre la teoría de la humedad, temperatura en el aire y la del grano, la humedad relativa y sus interacciones recíprocas; se da una explicación de los niveles seguros de la humedad del grano; además de investigación de la tecnología del secado al vacío.

La tecnología de vacío permite obtener presiones inferiores a la atmosférica, que dependiendo de los sistemas físicos utilizados para obtener esta característica, brinda una amplia gama de aplicaciones, como se puede ver a continuación (Tabla 1.1):

Tabla 1.1 Aplicaciones de las técnicas de vacío

<i>Situación física</i>	<i>Objetivo</i>	<i>Aplicaciones</i>
Baja presión	Obtener una diferencia de presión	Levitar, moldear, levantar, transportar.

	Disminuir la transferencia de energía	Aislamiento térmico, aislamiento eléctrico, microbalanza de vacío, simulación espacial
Camino libre medio grande	Evitar colisiones	Tubo de electrones, rayos catódicos, televisión, fotoceldas, fotomultiplicadores, rayos X, aceleradores, espectrómetros de masas, separadores de isótopos, soldadura de haz de electrones, calentamiento, microscopio electrónico, recubrimiento, destilación molecular
Periodos largos para la formación de monocapas	Obtener superficies limpias	Fricción, adhesión, estudios de emisión, pruebas de materiales para uso especial
Baja densidad molecular	Remover constituyentes activos de la atmósfera	Lámparas (incandescentes, fluorescentes, tubos eléctricos), fundición, recocido, empaquetado, encapsulado, detección de fugas
	Remover gases ocluidos o disueltos	Secado, deshidratación, concentración, degasamiento, liofilización, impregnación

Es por esto que se ha visto la necesidad de crear un proyecto que ayude a mejorar la calidad del arroz existente en su índice de humedad, mediante la aplicación del método de Tecnología de secado al vacío de Baja Densidad Molecular con Remoción de Gases Ocluidos o Disueltos, ya que esto significa una mejora en el producto, incrementando su competitividad y valor en el mercado lo que conlleva finalmente a mejorar la condición socio – económica tanto a nivel de productor como consumidor.

1.8 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1 PÉRDIDAS GENERADAS EN LA POSCOSECHA

En el mundo se han desplegado muchos esfuerzos con el fin de aumentar la producción y la productividad de los productos agrícolas. Estos esfuerzos, que

exigen inversiones importantes, se han visto parcialmente neutralizados por las pérdidas que se producen después de la maduración del grano.

No hay estudios concluyentes relativos a las pérdidas de granos posteriores a la cosecha, en América Latina. Se han hecho estimaciones, todas las cuales indican un mínimo de 20%. Tomando esa cifra como base, el perjuicio anual para el Brasil, por ejemplo, es superior a mil millones de dólares. Se piensa que en los demás países de América Latina las pérdidas de granos posteriores a la cosecha también son elevadas. Lo dicho refleja indirectamente las precarias condiciones en que se realiza el tratamiento de la mayor parte de los granos producidos. El tratamiento de granos se compone de una serie de operaciones unitarias, entre las que se destaca el secado. La falta de secado adecuado es una de las principales fuentes de pérdida de productos agrícolas.

Las técnicas de secado y almacenamiento de granos son ampliamente conocidas y utilizadas en países desarrollados. Esto quiere decir que, luego de adaptarlas a las condiciones de clima y realidad económica, es posible mejorar las técnicas y equipos que se emplean en América Latina. Por lo menos en principio, esta afirmación es valedera; no obstante, el mejoramiento aludido puede verse limitado por algunos factores entre los cuales los más importantes son: a) el nivel de instrucción del usuario; b) el costo de la tecnología; c) el volumen de producción por productor rural; y d) la disponibilidad de energía eléctrica.

1.2.2 FACTORES QUE AFECTAN LA CONSERVACIÓN DEL GRANO

Entre los alimentos de producción estacional, los granos son sin dudas uno de los principales recursos para el hombre, ya que son esencialmente estructuras de supervivencia, siendo capaces de soportar condiciones extremas gracias a que los mismos pueden permanecer en estado de vida latente, preservándola de su deterioro.

Las normas básicas dentro de la conservación son:

Sano → Seco → Limpio → Bajas temperaturas.

Sano: Integro y sin plagas.

Seco: Con niveles de humedad lo suficientemente bajos como para no favorecerle desarrollo de las plagas.

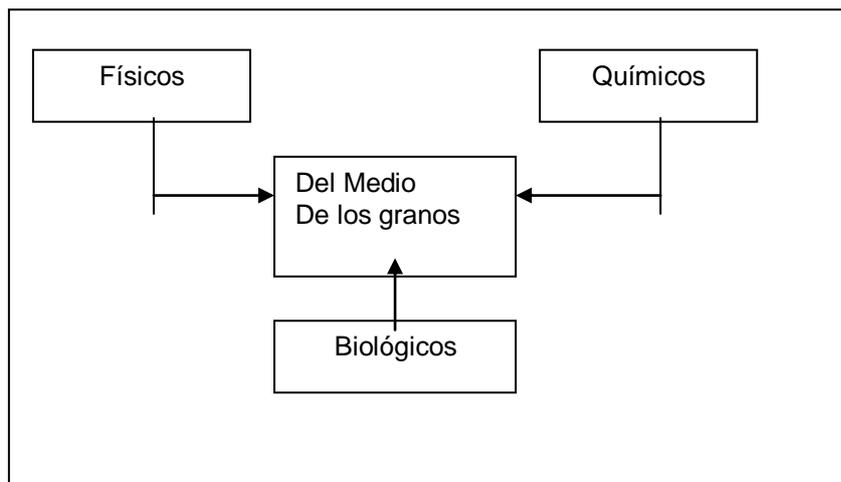
Limpio: Con la menor cantidad de impurezas y contaminantes.

Bajas temperaturas: Para disminuir el ritmo o intensidad de los procesos que pueden iniciar el deterioro.

El conjunto de granos está compuesto por elementos vivos e inertes en equilibrio inestable y en permanente evolución podemos determinar allí dos tipos de componentes bióticos y abióticos. Entre los primeros, los granos mismos, los microorganismos (hongos, bacterias), insectos, ácaros, roedores. Entre los segundos fundamentalmente temperatura y humedad.

El grano una vez cosechado no está seguro en el silo pudiendo ocurrir, y ello no es excepcional, que se deteriore y disminuya tanto en cantidad como en calidad

1.2.2.1 Factores que afectan la poscosecha



Factores físicos del medio: Temperatura, humedad y condiciones de cosecha, acondicionamiento y manipuleo.

Factores físicos de los granos: Porosidad, fluidez, segregación, sorción y propiedades termo – físicas.

Factores químicos del medio: composición Atmosférica intergranaria.

Factores químicos de los granos: Composición característica de los granos.

Factores biológicos del medio: Insectos, ácaros, microorganismos, roedores, pájaros y el hombre.

Factores biológicos de los granos: Respiración, longevidad, brotación y madurez poscosecha.

Estas variables están en permanente interacción ya que estas se afectan mutuamente. El análisis de un granel nunca se debe realizar en forma parcial sino que se deben integrar todos los aspectos.

El deterioro por falta de control de las variables puede ocasionar:

- Pérdida de poder germinativo
- Pérdida de energía germinativa
- Contaminación con plaguicidas
- Incremento de acidez
- Fermentación
- Aparición de toxicidad.
- Aumento de humedad y temperatura.
- Disminución del valor comercial.

1.9 OBJETIVO GENERAL

Diseñar y construir un prototipo experimental para secado de arroz con tecnología de vacío con capacidad de cinco kilogramos de arroz con cáscara, que permita obtener un producto con una humedad del 12 % en un periodo de secado de 2 horas, a partir de un grano con 20% de humedad.

1.10 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Diseñar el sistema termodinámico apropiado de secado de arroz.
- Diseñar y construir el sistema mecánico acorde a los requerimientos del sistema termodinámico
- Realizar el protocolo de pruebas del prototipo

- Elaborar el manual de operación y mantenimiento del prototipo
- Realizar el análisis económico – financiero del prototipo

1.11 ALCANCE

La elaboración del Proyecto de Grado empezará con la investigación y recolección de datos del producto analizado (arroz), para determinar sus propiedades iniciales que serán utilizadas para el diseño de los elementos termodinámicos y mecánicos del sistema de secado.

Una vez obtenidos los parámetros de diseño óptimos, se procederá a la realización de los planos, para la posterior construcción del prototipo de secadora experimental al vacío para secado de arroz con cáscara, que permita obtener un producto con una humedad del 12 % en un periodo de secado de 2 horas, a partir de un grano con 20% de humedad.

Con el mecanismo ya fabricado se procederá a la realización de los ensayos de laboratorio y de campo, con su respectivo manual de Operación y Mantenimiento en base a los resultados obtenidos.

Finalmente se realizará la evaluación Económico – Financiera del Proyecto.

1.12 JUSTIFICACION

El cultivo del arroz es uno de los de mayor importancia dentro del sector agrícola del Ecuador y del mundo, no solo por su magnitud económica, sino también por su importancia alimentaria. La actividad vinculada a este producto da empleo al 22% de la población económicamente activa según el Servicio de Información Agropecuaria del Ministerio de Agricultura y Ganadería del Ecuador.

Los países de América Latina, incluido el Ecuador, están enfrentando en la actualidad una profunda contradicción:

a) Por un lado tienen una urgente necesidad de modernizar su agricultura, como única vía realista para lograr que ella sea eficiente, rentable y competitiva.

b) Por otro lado, los gobiernos están disminuyendo el aporte de subsidios y créditos (y por ende de insumos y equipos) que tradicionalmente han sido propuestos para tecnificar y modernizar la agricultura.

Frente a esta situación, los agricultores inexorablemente tendrán que viabilizarse técnica y económicamente, a través de una mayor eficiencia productiva, gerencial y organizativa con el agravante de que ésta deberá lograrse con menos créditos e insumos; además, la agricultura rentable tendrá que ser sinónimo y consecuencia de agricultura eficiente, debido a que ya no existen subsidios para compensar ineficiencias productivas y gerenciales; sobrevivirán aquéllos que se profesionalicen y que tengan actitudes y procedimientos empresariales y tecnológicos como requisitos indispensables para lograr su rentabilidad y competitividad.

Frente a esta contradicción y a partir de ahora, la viabilización de los agricultores se vincula obligatoriamente: por una fuerte introducción de "insumos intelectuales" en el proceso productivo y gerencial, como única alternativa realista para contrarrestar la insuficiencia de "insumos materiales"; por la correcta adopción de tecnologías que sean ahorradoras de factores escasos y ocupadoras de mano de obra; por la mayor productividad del hombre y de la tierra; por la buena administración de los predios; por el uso racional de los recursos disponibles; por la eliminación de las ociosidades y sobredimensionamientos; por la disminución de costos de los insumos y también de los productos cosechados; por la reducción de las pérdidas en la cosecha y posteriores a ella; por la incorporación de valor agregado a nivel predial o comunitario; por el mejoramiento de la calidad de los excedentes y por la reducción de los eslabones de las cadenas de intermediación.

Como resultado de todo lo anterior (y no de subsidios y proteccionismos inciertos y efímeros) los agricultores podrán lograr la reducción de los costos unitarios de producción al mínimo y la elevación de los precios de venta de los excedentes al máximo; y como consecuencia de estas medidas realistas, podrán finalmente incrementar sus ingresos. Este pareciera ser el camino más realista o tal vez el único posible.

El proyecto está enfocado básicamente a mejorar la calidad del arroz, con un procedimiento adecuado de operación en el secado, a través de un proceso más limpio, rápido y eficiente, que se obtiene mediante la tecnología de vacío; lográndose de esta forma un beneficio directo para el productor debido a que las mejores características del producto permiten mejorar la competitividad en el mercado, además con la técnica y recursos tecnológicos empleados se consigue la reducción en los costos de producción e incremento del nivel de rendimiento del proceso y por tanto el aumento de los ingresos cubriendo los

valores promedios de producción, lo que genera mayores ganancias para los sectores involucrados.

CAPITULO 2

2. SISTEMAS DE SECADO DE ARROZ

2.1 CARACTERIZACIÓN DEL ARROZ

El arroz se constituye en una fuente básica de alimento para la población del Ecuador y de varios países en el contexto internacional. Es consumido en todo el planeta de varias formas, cocinado que es la más común, frito inclusive como harina.

La harina de arroz por su riqueza en féculas, sirve para elaborar materias alimenticias diversas, y se emplea también, en algunos casos, en las fábricas de cerveza con el fin de lograr una suficiente riqueza alcohólica gastando poca malta.

Nombre común: Arroz

Especie botánica: Oriza Sativa

2.1.1 PARTES DE LA PLANTA DE ARROZ

A continuación se detallan las partes, en las diferentes etapas del crecimiento del arroz:

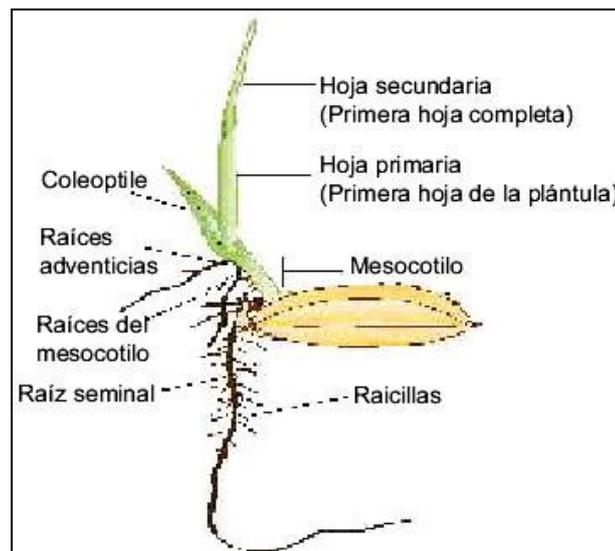


Figura 2.1 Semilla en Germinación

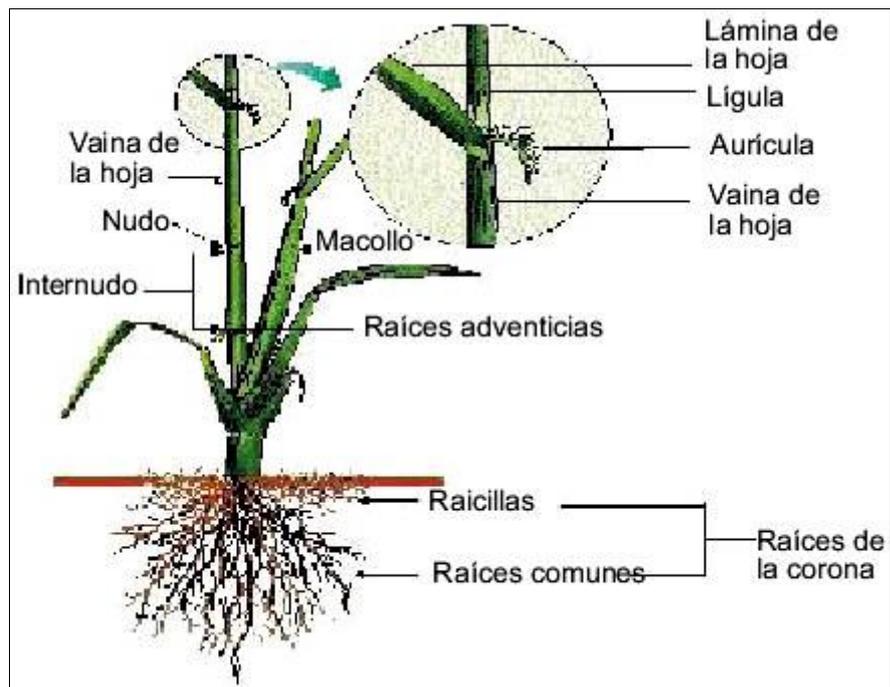


Figura 2.2 Partes vegetativas

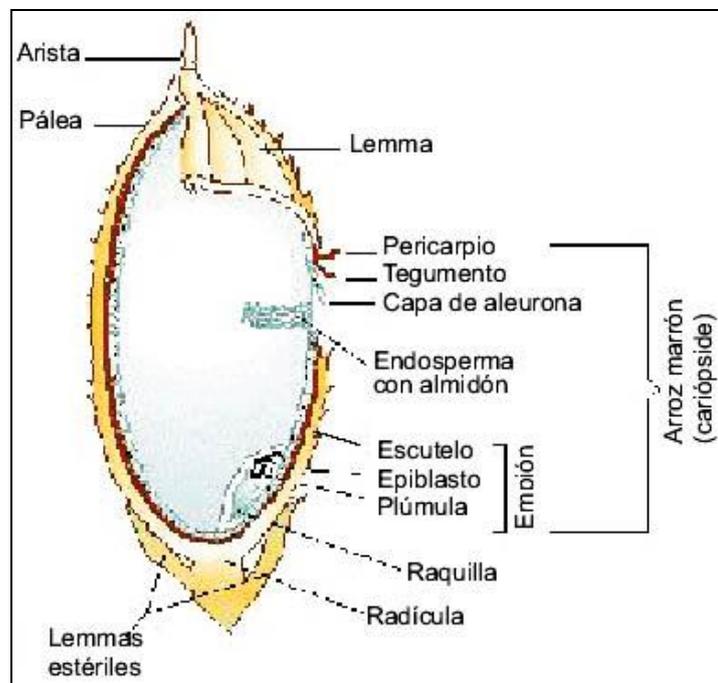


Figura 2.3 Partes del cariósido de arroz (grano o semilla)

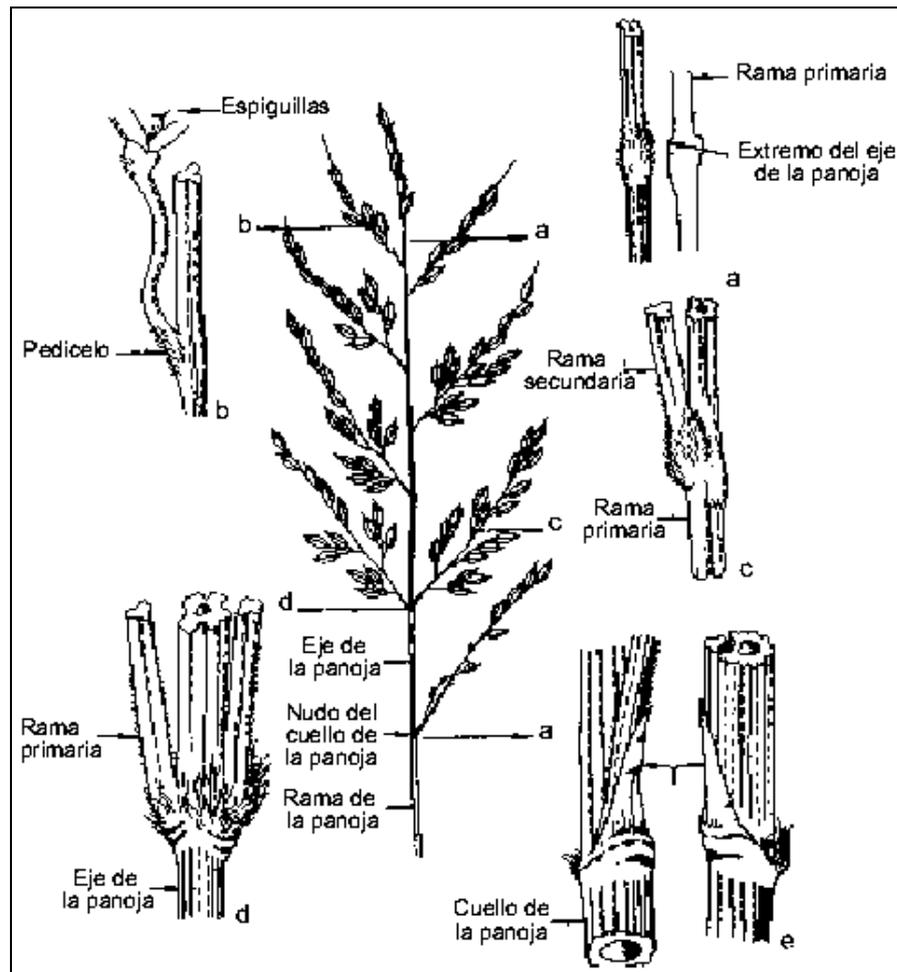


Figura 2.4 Partes de una panoja

2.1.2 ETAPAS DEL CRECIMIENTO Y DESARROLLO DE LA PLANTA DE ARROZ

La historia de la vida de la planta de arroz presenta tres fases importantes:

- a) La fase vegetativa.
- b) La fase reproductiva.
- c) La fase de maduración.

Las etapas de crecimiento de la planta de arroz están enumeradas de 1 a 9, donde 1 se refiere a la etapa de la germinación y 9 se refiere a la etapa de la madurez (Tabla 2.1.). La fase vegetativa se refiere al período desde la germinación hasta el macollaje. La fase reproductiva se refiere al período desde la iniciación de los primordios de la panoja hasta la floración. La etapa de la maduración se refiere al período desde la espigazón a la madurez.

Tabla 2.1 Las nueve etapas de crecimiento de la planta de arroz.

Etapa	Descripción	Código
Germinación	Desde la siembra hasta la emergencia del coleoptile de la	1

	semilla	
Plántula	Desde la emergencia del coleoptile hasta la aparición de la quinta hoja (contando como primera hoja la primera hoja sin lámina)	2
Macollaje	Desde la aparición del primer macollo hasta la iniciación de la panoja	3
Elongación y engrosamiento de la vaina	Desde la iniciación de la panoja hasta su completo desarrollo dentro de la vaina de la hoja bandera	4
Espigazón	Desde la aparición de la punta de la panoja fuera de la vaina de la hoja bandera hasta más de 90% de emergencia de la panoja	5
Floración	Desde la primera floración hasta que se completa la floración de la panoja	6
Estado lechoso	El cariósipide desde estado acuoso a lechoso	7
Estado pastoso	El cariósipide desde estado de masa blanda a dura	8
Maduración	Maduración de más del 80% de las espiguillas en la panoja. El cariósipide está completamente desarrollado en tamaño, duro y sin tonalidades verdosas	9

2.1.3 CARACTERÍSTICAS DE LAS ZONAS DE CULTIVO

Clima: Cálido

Temperatura: 18 °C – 30 °C

PH: 5.5 - 7.0

Precipitación anual: 2000 - 3100 mm

Región del país: Nororiente Orellana, Napo, Sucumbíos y Costa Ecuatoriana.

Tipo de suelo: franco arcilloso con buen drenaje.

2.1.4 VARIEDADES DE ARROZ EN EL ECUADOR

La variedad de arroz con la cual se va a trabajar es del tipo INIAP – 14 Filipino ya que este es el que se proporcionó en la piladora para los ensayos debido a que es el más cultivado en la zona. Las demás variedades de arroz existentes en el Ecuador se encuentran en Anexos

Variedad : INIAP-14 Filipino

Estación de Experimentación: Boliche.

Responsables: Andrade E, Francisco. Celi H, Roberto. Hurtado D, José.

Cedeño B, Franklin. Arboleda, Javier. Monteverde, Carlos (Fenarroz). Yagual, Kleber (Fenarroz). Cevallos, Bolívar (Fenarroz). Tulcán, Walter (Fenarroz). López, Hugo (Fenarroz).

Rendimiento: Rendimiento (riego, trasplante) 5,8 a 11 t/ha.

Rendimiento (secado, siembra directa) 4,8 a 6 t/ha.

Características Morfológicas y Agronómicas:

Ciclo vegetativo (riego, trasplante) 110 a 127 días. Ciclo vegetativo (secado, siembra directa) 113 a 117 días. Altura de planta (riego, trasplante) 81 a 100 cm. Altura de planta (secado, siembra directa) 99 a 107 cm. Número de panículas/planta (riego, trasplante) 14 a 38. Longitud del grano 7,1 mm. Ancho de grano 2,19 mm. Granos llenos/panícula 89%. Longitud de canícula 23 cm. Peso de 1000 granos 26g. Grano entero al pilar 62 %. Latencia de 4 a 6 semanas.

Reacción a Plagas y Enfermedades:

Moderadamente resistente a hoja blanca. Resistente a *Pyricularia oryzae*.

Resistente a *Tagosodes oryzae*.

Resistente al acame.

2.1.5 SIEMBRA

Preparación Del Terreno

Arada (se recomienda cada 4 ciclos), rastrada y nivelada. Para siembras por trasplante y voleo con semilla pregerminada, se debe realizar la labor de fanguero.

Época de siembra: En cultivo de invierno, en enero. En cultivos de verano (con riego), en junio – julio

Cantidad de semilla: En siembra directa de 80 a 100 kg de semilla por hectárea.
Para semilleros de 30 a 45 kg de semilla por hectárea (150 a 200 gramos por metro cuadrado).

2.1.5.1 Sistemas de Siembra

Directa: con sembradora a 18 cm entre hileras (chorro continuo). Al voleo en tierra seca, o sobre suelo fangueado con semilla pregerminada. Espeque a una distancia de 20 X 30 cm, entre hileras y golpes, respectivamente.

Transplante: Se realiza con plántulas de 20 a 25 días. La distancia entre hileras es de 30 cm x 20 cm entre golpes, dejando 2 a 3 plántulas por sitio.

Fertilización:

Teniendo en cuenta el período vegetativo de las variedades, se recomienda aplicar el nitrógeno al voleo y en varias épocas; así para variedades precoces (INIAP-11, INIAP-12 e INIAP-14) en siembra directa, aplicar el fertilizante nitrogenado en dos fracciones a los 20 y 40 días después de la siembra. En siembra de transplante a los 10 días después del transplante y la segunda a 20 días después de la primera aplicación.

Para variedades de ciclo intermedio (INIAP-7, INIAP-415), en siembra directa se debe aplicar la dosis total del nitrógeno en tres fracciones, a los 20, 40 y 60 días después de la siembra, que corresponde al inicio del macollamiento, máximo macollamiento e iniciación de la panícula respectivamente. En siembra de transplante se debe aplicar el nitrógeno a los 10, 30 y 50 días después del transplante.

Control de malezas:

Debe evitarse períodos prolongados de sequía; además, fallas en la siembra deben cubrirse para no permitir invasión de malezas. No aplicar Propanil en campos con problemas de salinidad.

Rotar productos dentro del ciclo de cultivo y entre ciclos de producción.

Riegos:

En siembra directa el primer riego debe darse lo más pronto posible. Después se darán 2 a 3 riegos hasta que las plantas tengan 25 a 30 días; luego se procede a la inundación permanente. Se suspende el riego únicamente para aplicar herbicidas o insecticidas y 15 días antes de cosechar.

En siembra de transplante el riego por inundación debe establecerse 8 o 10 días después del transplante

Cosecha:

Se realiza a máquina usando “combinadas” o manualmente cortando con hoces y luego proceder al chicoteo

Almacenamiento:

Hay que usar bodegas limpias y desinfectadas. El grano debe estar completamente seco (12% de humedad), según recomendaciones dadas por el INIAP³.

2.2 TECNOLOGÍAS DE SECADO

El secado de granos se puede definir como el método universal de adecuar los granos mediante la eliminación del agua hasta un nivel que prevenga el crecimiento de hongos y bacterias, de manera que se conserve el aspecto y la calidad nutritiva del grano como alimento, o su viabilidad como semilla. El nivel seguro de humedad para el almacenamiento de granos se encuentra entre el 10 y el 13%, base húmeda, para las principales especies, dadas las condiciones medias de temperatura ($T = 27^{\circ}\text{C}$) y humedad relativa en el Ecuador ($\phi = 70\%$)

Esta sección del proyecto tiene como finalidad conocer los principios del secado y de ciertas tecnologías y equipos (secadores) destinados a secar granos, enfocándose en temas básicos como son: la psicrometría, la higroscopia y la tecnología de vacío.

2.2.1 PSICROMETRÍA:

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

En la conservación y almacenamiento de productos agrícolas se emplean diversas prácticas con participación directa de la psicrometría; una de dichas prácticas es el secado. En el secado a bajas temperaturas en particular, la tasa de secado depende de la capacidad del aire para evaporar la humedad (potencial de secado), la cual es determinada por las condiciones psicrométricas del aire: temperatura y humedad relativa.

³ INIAP: Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria

En el secado y almacenamiento uno de los conceptos más importantes es el contenido de humedad de equilibrio. Así se denomina al intercambio recíproco de humedad entre materiales higroscópicos, tales como los granos, y el aire que los rodea; la condición de intercambio recíproco de humedad indica el equilibrio que hay entre el aire y el material. Se establece dicho equilibrio cuando la presión de vapor que corresponde a la humedad del producto es igual a la presión de vapor de la humedad presente en el aire, en condiciones fijas de temperatura. Por tanto, en los estudios de higroscopia, las propiedades termodinámicas del aire húmedo son de fundamental importancia.

2.2.1.1 Aire atmosférico

Propiedades termodinámicas del aire húmedo

Hay diversas propiedades termodinámicas fundamentales ligadas a las propiedades del aire húmedo. Hay dos propiedades independientes, además de la presión atmosférica necesaria para establecer el estado termodinámico del aire húmedo.

Tres propiedades se relacionan con la temperatura:

- a. Temperatura de bulbo seco.
- b. Temperatura termodinámica de bulbo húmedo.
- c. Temperatura del punto de rocío.

Algunas propiedades termodinámicas caracterizan la cantidad de vapor de agua presente en el aire húmedo:

- a. Presión de vapor.
- b. Razón de humedad.
- c. Humedad relativa.
- d. Grado de saturación.

Otras propiedades de fundamental importancia, relacionadas con el volumen ocupado por el aire y con la energía del aire, respectivamente, son:

- a. El volumen específico.
- b. La entalpía.

La entalpía y el volumen específico: son propiedades de la mezcla de aire seco y vapor de agua, pero para mayor comodidad se expresan sobre la base de una unidad de masa de aire seco.

La temperatura psicrométrica de bulbo húmedo: (T_{bh}) no es una propiedad termodinámica de la mezcla de aire seco y vapor de agua y se tratará separadamente.

A continuación se presenta una breve descripción de cada una de estas propiedades:

Temperatura de bulbo seco (T)

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

Temperatura de punto de rocío (T_{pr})

La temperatura de punto de rocío, es la temperatura a la cual el aire húmedo no saturado se satura, es decir, cuando el vapor de agua comienza a condensarse, por un proceso de enfriamiento, mientras que la presión y la razón de humedad se mantienen constantes.

Temperatura termodinámica de bulbo húmedo (T^)*

La temperatura termodinámica de bulbo húmedo, es la temperatura de equilibrio que se alcanza cuando la mezcla de aire seco y vapor de agua pasa por un proceso de enfriamiento adiabático hasta llegar a la saturación.

Presión de vapor (P_v)

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

Razón de humedad (razón de mezcla) (W)

La razón de humedad del aire, se define como la relación entre la masa de vapor de agua y la masa de aire seco en un volumen dado de mezcla. Algunos autores confunden los términos razón de humedad y humedad absoluta; la humedad absoluta, denominada también densidad del vapor de agua, es la relación entre la masa de vapor de agua y el volumen que ocupa la mezcla de aire seco y vapor de agua.

Humedad relativa (Φ)

La humedad relativa del aire, se define como la razón entre la presión de vapor de agua en un momento dado (P_v) y la presión de vapor de agua cuando el aire está saturado de humedad (P_{vs}), a la misma temperatura. La humedad relativa se puede expresar como decimal o como porcentaje.

Grado de saturación (μ)

El grado de saturación, es la relación entre la razón de humedad real de la mezcla (W) y la razón de humedad del aire en estado de saturación (W_s), a igual temperatura y presión atmosférica.

Entalpía (h)

La entalpía de la mezcla de aire seco y vapor de agua, es la energía del aire húmedo por unidad de masa de aire seco, por encima de una temperatura de referencia; dado que en ingeniería sólo las diferencias de entalpía tienen interés práctico, el valor que se escoja para la temperatura de referencia carece de importancia.

Volumen específico (V_e)

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

Temperatura psicrométrica de bulbo húmedo

Un psicrómetro (**Figura 2.5**) se compone de dos termómetros, uno de ellos envuelto en una tela constantemente humedecida (termómetro de bulbo húmedo) y otro, al lado del primero, en simple equilibrio térmico con el aire atmosférico (termómetro de bulbo seco). El termómetro de bulbo húmedo recibe sobre sí un flujo de aire constante por medio de un sistema de ventilación. Se evapora así la humedad y se retira energía del bulbo húmedo. La temperatura baja, y al llegar al punto de equilibrio, se estabiliza. La temperatura que registra el termómetro en esas condiciones se llama temperatura psicrométrica de bulbo húmedo. (T_{bh})

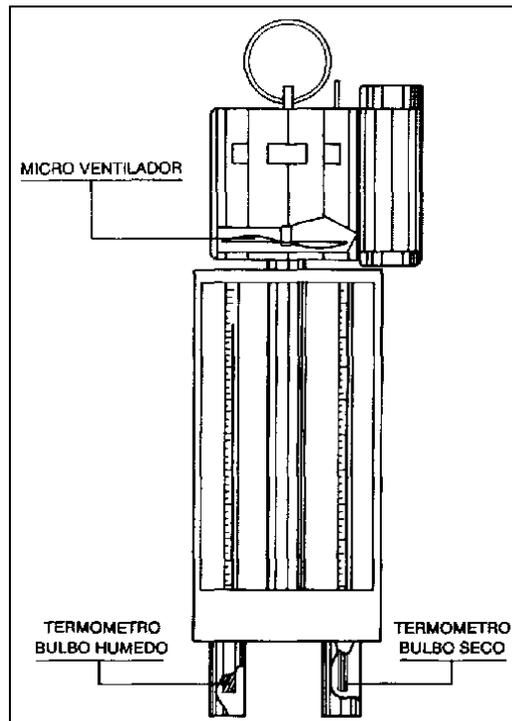


Figura 2.5 Esquema de un psicrómetro con sistema de aspiración de aire

2.2.1.2 Gráfico psicrométrico

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

En el gráfico psicrométrico, una vez elegidos las coordenadas, las demás propiedades aparecen como parámetros. Dos propiedades independientes cualesquiera, incluso la temperatura psicrométrica de bulbo húmedo, fijan el estado de la mezcla (punto de estado).

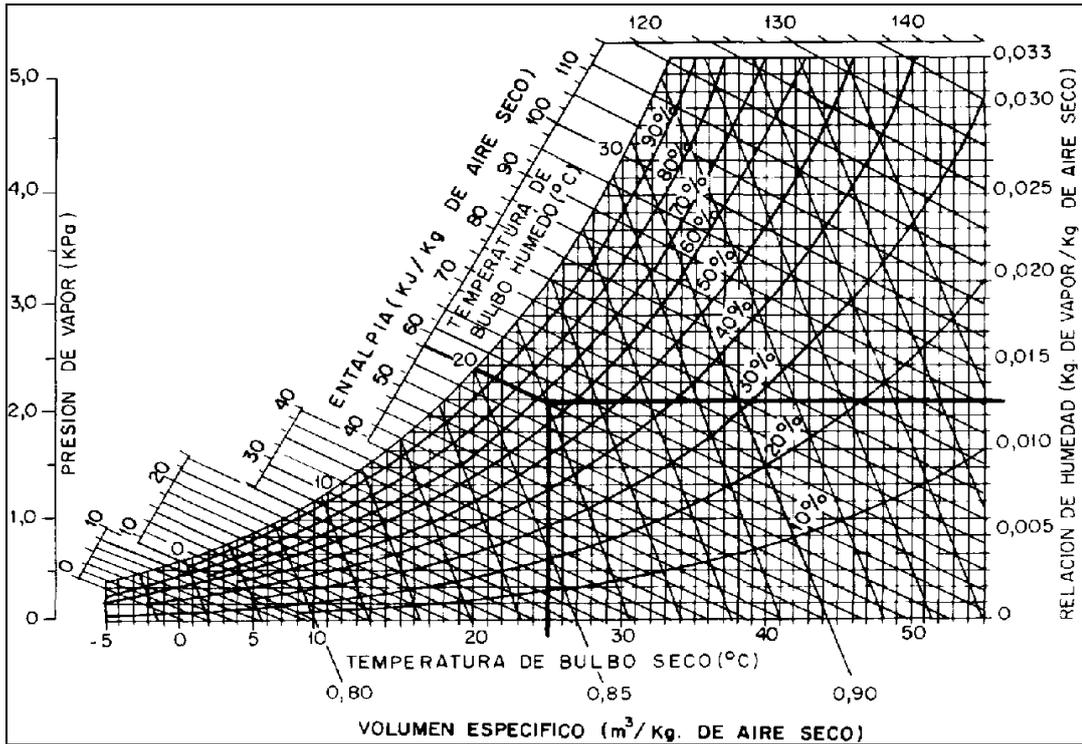


Figura 2.6 Gráfico Psicrométrico, Presión Atmosférica 101.325 KPa

Determinación de las propiedades en un punto de estado

A continuación se detalla el significado de las líneas con sus respectivas propiedades en el gráfico psicrométrico.

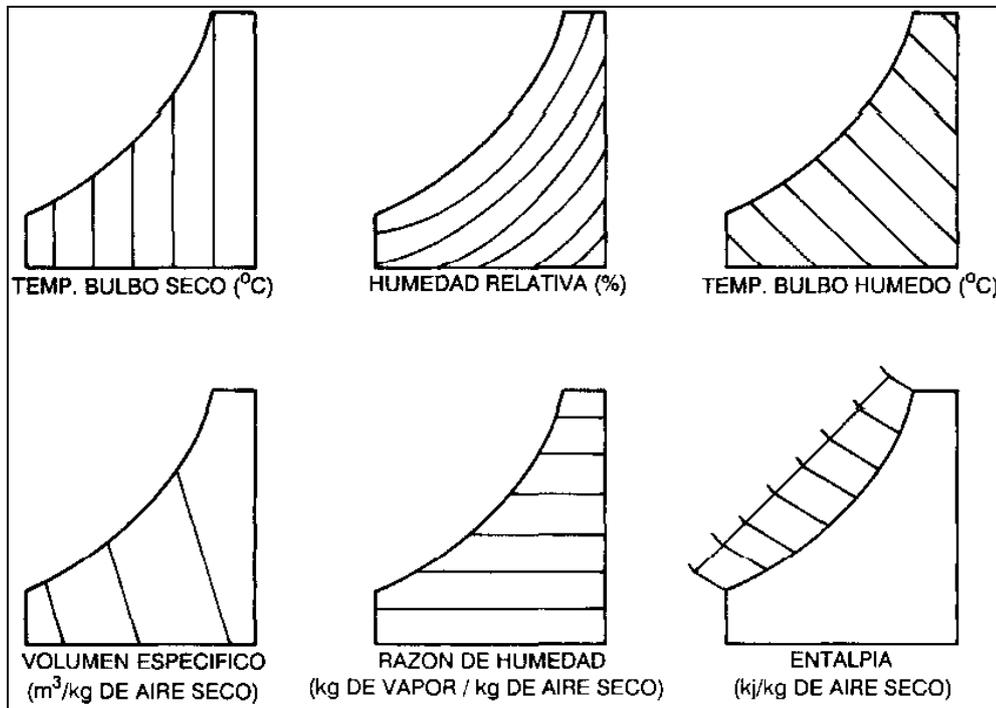


Figura 2.7 Gráficos Psicrométricos que representan las propiedades del aire

Ejemplo: Supongamos que se ha determinado, por medio de un psicrómetro ventilado, la temperatura de bulbo seco 25 °C, y la temperatura de bulbo húmedo 20 °C. Mediante el gráfico psicrométrico se pueden determinar las demás propiedades termodinámicas del aire húmedo. En la Tabla 2.2 se muestran los valores de las propiedades del aire húmedo, definidas en ese punto de estado, obtenidos del gráfico psicrométrico (**Figura 2.6**), en el cual se representa el punto de estado número 1.

Tabla 2.2 Propiedades termodinámicas del aire húmedo definidas en un punto de estado

Punto de estado	P (k Pa)	T (°C)	T _{bh} (°C)	T _{pr} (°C)	P _v (Pa)	Φ	V _e (m ³ /kg)	W (kg/kg)	h (kJ/kg)
T = 25°C Tbh = 20°C	101,325	25	20	17,7	2,1	65	0,86	0,0127	57,5

2.2.1.3 Humedad relativa y déficit de presión de vapor

La medida de la humedad relativa del aire se puede obtener mediante las temperaturas de bulbo seco y de bulbo húmedo, medidas con un psicrómetro. La disminución de la temperatura de bulbo húmedo depende de la cantidad de vapor de agua que contiene el aire, además de la velocidad del aire en torno a la tela embebida en agua destilada. El déficit de saturación se encuentra por la diferencia entre la presión de vapor de agua saturado (P_{vs}) y la presión de vapor real del aire (P_v), a la temperatura en que se encuentra el aire.

Se puede determinar la humedad relativa del aire en lugares en que no se dispone de gráficos psicrométricos, de acuerdo con la altura local, o incluso en situaciones en que no se dispone de psicrómetros con sistema de movimiento de aire.

Tabla 2.3 Presión Barométrica (mbar) a diferentes alturas

Altitud (m)	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900
0	1013	1001	990	978	967	955	944	933	921	901
1000	899	888	877	867	856	845	835	825	816	805
2000	795	785	776	766	757	747	738	729	719	710
3000	701	693	684	676	667	658	650	641	633	624
4000	616	608	600	593	585	577	570	562	555	547
5000	540	533	526	519	512	505	498	492	485	479

Fuente: DOOREMBOS (1976)

En muchos casos, lo habitual es expresar la humedad del aire en términos de humedad relativa, como ser en situaciones en que se supone que el contenido de humedad de un producto biológico está en equilibrio con la humedad y temperatura del aire, pasado un lapso prolongado. En otros casos, en cambio, la tasa a la cual se produce un fenómeno, como consecuencia de una reacción a las condiciones de humedad del aire, está mucho más relacionada con el déficit de presión de vapor que con la humedad relativa.

2.2.2 HIGROSCOPIA:

El agua participa activamente en la formación de los granos de cereales y oleaginosas, pues es el vehículo de transporte de las sustancias nutritivas, a partir de hojas y raíces, que mediante procesos bioquímicos se polimerizan en almidón, lípidos y proteínas, durante la fase de maduración. Cuando alcanza la madurez fisiológica, el grano se independiza de la planta y, según las condiciones psicrométricas del aire (temperatura y humedad relativa), pierde humedad hasta el momento de la cosecha.

El comportamiento de los granos y de sus productos durante el almacenamiento depende de la temperatura y del contenido de humedad que presenta el producto. No se puede emprender ningún análisis de esta materia sin referirse a dichos parámetros. El contenido de humedad, es decir, la cantidad de agua contenida en el grano, se puede expresar tanto en base húmeda como en base seca. La humedad con base húmeda, H_{bh} , y la humedad con base seca, H_{bs} , se definen respectivamente con las ecuaciones 2.1 y 2.2:

$$H_{bh} = \frac{m_w}{m_w + m_s} = \frac{m_w}{m_t} \quad (2.1)$$

$$H_{bs} = \frac{m_w}{m_s} \quad (2.2)$$

Donde:

H_{bh} = Humedad en base húmeda

H_{bs} = Humedad en base seca

m_w = Masa de agua (kg)

m_t = Masa total (kg)

m_s = Masa seca (kg)

El contenido de humedad con base húmeda se puede expresar tanto en decimal como en porcentaje (parte de los componentes del material en relación con el total); en cambio, el contenido de humedad con base seca sólo tiene sentido si se expresa en decimal, puesto que se trata de una relación entre componentes del material. En el comercio y la industria se emplea mayormente el contenido de humedad con base húmeda, mientras que en ciencia el contenido de humedad con base seca resulta más adecuado.

Para comprender el papel que desempeña el agua de los granos en los procesos de secado y almacenamiento, es preciso comprender primero los principios básicos que intervienen en la fijación del agua por los componentes químicos de los granos. Cuando dichos principios están claros se puede apreciar todo el alcance de los diversos aspectos prácticos que tiene la relación entre el agua contenida en los granos y los procesos de secado y almacenamiento.

2.2.2.1 Fenómeno de "sorción"

El agua contenida en los granos se presenta en distintas formas, en función de la naturaleza de las ligazones químicas que existen entre los componentes de la materia seca y las moléculas de agua, lo que determina los diferentes niveles de hidratación del producto.

Una parte del agua está estrechamente vinculada con la sustancia adsorbente. Se compone de una capa monomolecular ligada a determinados agrupamientos moleculares fuertemente polarizados, tales como los hidróxilos (- OH). Puede estar combinada con la sustancia por medio de ligazones químicas, o sea, es parte integrante de una sustancia dada. Esta forma de agua se la puede eliminar sólo bajo rigurosas condiciones de temperatura y tiempo, como las que se emplean para determinar la humedad de los granos en estufa.

También se encuentra en los granos una cantidad de agua contenida en una capa polimolecular que se fija sobre la aludida capa monomolecular. Las distintas capas monomoleculares que componen la capa polimolecular están ligadas a la materia por medio de ligazones electromagnéticas y forman agua pseudoligada, no solvente, sin papel biológico y fuertemente adsorbida.

Los granos contienen además agua líquida bajo tensión osmótica. Se trata de agua solvente que retienen diferentes sustancias en las células del material biológico; aparece débilmente adsorbida, cumple un papel biológico y puede permitir las reacciones químicas (enzimáticas), además del desarrollo de hongos; se elimina, en gran parte, con el secado.

Cierta cantidad de agua se puede mantener libremente en los espacios correspondientes a los poros de los granos, es decir, se mantiene débilmente en el sistema gracias a fuerzas capilares. Esta cantidad de agua se conoce como agua de impregnación; algunos investigadores la llaman agua libre o adsorbida. Tiene las mismas propiedades que el agua

libre. Las paredes celulares la retienen mecánicamente en el grano; las moléculas de las sustancias adsorbentes no se ven afectadas, actúan sólo como estructura de soporte. La presencia de agua libre en el grano lo inhabilita para el almacenamiento, puesto que puede favorecer el desarrollo de hongos y bacterias. Este tipo de agua se evapora fácilmente en el secado.

De acuerdo con lo anterior, el agua está adsorbida, es decir, se mantiene en los granos gracias a fuerzas de atracción molecular, o bien está firmemente ligada a la sustancia adsorbente. El término general "sorción" se usa para denotar esta interacción agua-sustancia adsorbente. Los términos generales adsorción y desorción se usan especialmente para denotar el proceso de ganar o perder agua por medio de sorción.

Esta clasificación de los tipos de agua presente en los granos no es más que una clasificación en categorías habituales. Cabe tener presente que en los sistemas coloidales, tales como los granos, que están compuestos de varias sustancias y poseen una estructura organizada, se presentan muchos tipos de agua ligada en el abanico que va desde el agua libre al agua ligada químicamente.

La Figura 2.8 muestra un ambiente (aire) con una temperatura determinada (T) y humedad relativa constantes, en el cual está colocado un grano de cereal.

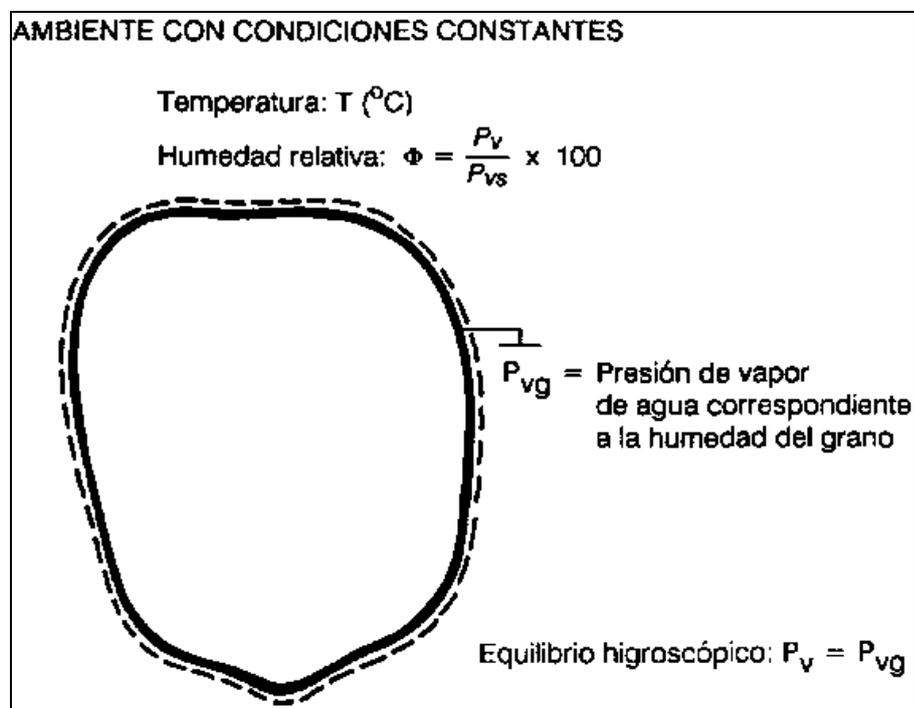


Figura 2.8 Presiones parciales del vapor de agua en el aire P_v y en la superficie del grano P_{vg} .

La humedad relativa del aire del ambiente representado en la **Figura 2.8** está dada por la ecuación 2. :

$$\phi = \frac{P_v}{P_{vs}} \times 100 \quad (2.3)$$

Donde

P_v = Presión de vapor de agua

P_{vs} = Presión de vapor de agua en saturación

La presión parcial del vapor de agua que existe en el micro ambiente (capa de aire límite) en contacto con el grano es P_{vg} . Cuando el grano está en equilibrio higroscópico con el aire que lo envuelve, hay intercambio recíproco de humedad (agua) entre el aire y el grano, porque no hay diferencia de presión parcial de vapor entre la humedad de la superficie del grano y la del aire. Se tiene, por tanto:

$$P_v = P_{vg} \quad (2.4)$$

La actividad del agua del grano, A_w , se define como:

$$A_w = P_{vg}/P_{vs} \quad (2.5)$$

En el equilibrio higroscópico, la actividad del agua de los granos es idéntica a la de la humedad relativa del aire. En tal caso,

$$A_w = \phi = P_v/P_{vs} \quad (2.6)$$

y el contenido de humedad del grano es igual al contenido de humedad de equilibrio, para las condiciones de temperatura y humedad relativa del aire.

Isotermas de sorción

La humedad de equilibrio se define como el contenido de humedad de un material higroscópico después de estar expuesto a un ambiente en condiciones controladas de temperatura y humedad relativa, durante un lapso prolongado. Se puede decir, además, que el material está en equilibrio higroscópico con el ambiente en que se encuentra cuando la presión de vapor de agua correspondiente a la humedad del material es igual a la presión de vapor de agua del aire ambiente. Para cada especie o variedad de material, la tensión de vapor tiene un valor característico acorde con la temperatura y el contenido de humedad del material.

La importancia que tiene la obtención de datos experimentales de equilibrio higroscópico de los productos agrícolas es bien conocida. Dada la importancia de este concepto, por sus innumerables aplicaciones en el secado, almacenamiento y manejo de los productos agrícolas, se han desplegado esfuerzos para obtener ecuaciones que expresen el contenido de humedad de equilibrio respecto de cada producto, en función de la humedad relativa y la temperatura del aire.

La utilidad de obtener esas ecuaciones son múltiples: a) las variaciones continuas de temperatura y humedad del aire en contacto con los productos almacenados originan cambios en el contenido de humedad de equilibrio. En las investigaciones relativas al almacenamiento, frecuentemente es preciso calcular dicho tenor de humedad por medio de dichas ecuaciones; y b) en los cálculos de secado, independientemente del sistema de secado que se ocupe, los valores de contenido de humedad de equilibrio se calculan incontables veces. Cabe destacar también la importancia de conocer esas ecuaciones de equilibrio higroscópico, para calcular la entalpía de la vaporización del agua de los productos biológicos en los procesos de secado.

Los valores del contenido de humedad de equilibrio de los productos biológicos dependen, principalmente, de la temperatura y de la humedad relativa del aire, de la especie o variedad del producto. La madurez fisiológica y la historia del producto, junto con la manera en que se obtuvo el equilibrio (adsorción o desorción), también influyen en la humedad de equilibrio.

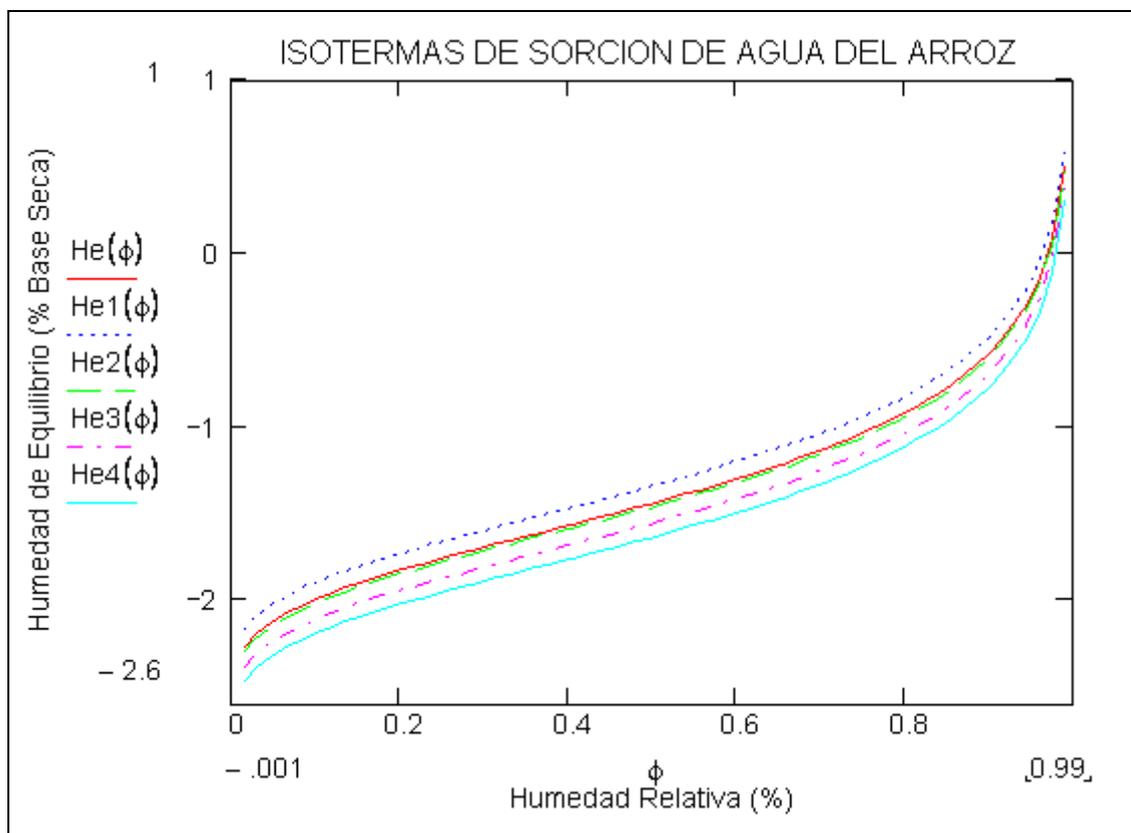


Figura 2.9. Gráfico de Isotermas de sorción a diferentes temperaturas

2.2.2.2 Modelos de equilibrio higroscópico

Se han propuesto diversos modelos teóricos, semi teóricos y empíricos para expresar el contenido de humedad de equilibrio de los granos. Pese a las investigaciones en este campo, ningún modelo teórico ha sido capaz hasta ahora de predecir exactamente el contenido de humedad de equilibrio de granos en todas las gamas de temperatura y humedad relativa. Además, sólo algunos modelos tienen en cuenta la temperatura como parámetro. Se han propuesto modificaciones a diversas ecuaciones y, en este caso, la gama de validez aumenta sustancialmente.

La ecuación de Kelvin se aplica solamente a las humedades relativas superiores a 95% y la ecuación de Langmuir no se aplica a productos alimenticios. La ecuación de BET y la versión que presenta Rounsley permiten estimar la parte de agua adsorbida en relación con el total de agua ligada. Las ecuaciones de BET, Harkins-Jura y Rounsley, ofrecen resultados aceptables solamente para valores de humedad relativa inferiores a 30%. La ecuación de Henderson y la de Chung-Pfost son las que mejor expresan el contenido de humedad de equilibrio de granos en gamas más amplias de temperatura y humedad relativa. Las modificaciones empíricas mejoraron sustancialmente dichas ecuaciones y las hicieron aplicables a una mayor parte del abanico de temperaturas y humedades relativas.

Ecuaciones de humedad de equilibrio para diversos productos

Ecuación de Henderson modificada

$$H_e = \frac{1}{100} \left[\frac{\ln(1 - \phi)}{-c_1(T + c_2)} \right]^{1/c_3} \quad (2.7)$$

$$\Phi = 1 - \exp [-c_1 (T + c_2) (100 - H_e)^{c_3}] \quad (2.8)$$

Donde:

ϕ = Humedad relativa del aire

c_1, c_2, c_3 = Constantes de la ecuación de Henderson modificada (ver Tabla 2.4)

T= Temperatura (°C)

Ecuación de Chung-Pfost

$$H_e = d_1 - d_2 (\ln - (T + d_3) \ln \phi) \quad (2.9)$$

$$\phi = \exp \left(\frac{d_4}{T + d_3} \exp(-d_5 H_e) \right) \quad (2.10)$$

Donde:

ϕ = Humedad relativa del aire

d_1, d_2, d_3, d_4, d_5 = Constantes de la ecuación de Chung - Pfost (ver Tabla 2.5)

T= Temperatura (°C)

Tabla 2.4 Parámetros de la ecuación de Henderson modificada, respecto de diversos productos

PRODUCTO	c_1	c_2	c_3
Cebada	$2,2919 \times 10^{-5}$	195,267	2,0123
Fréjol comestible	2,0899	254,23	1,8812
Maíz	8,6541	49,810	1,8634
Maní con cáscara	6,6587	23,318	2,5362
Arroz con cáscara	1,9187	51,161	2,4451
Sorgo	0,8532	113,725	2,4757
Soja	30,5327	134,136	1,2164
Trigo (durum)	2,5738	70,318	2,2110
Trigo (duro)	2,3007	55,815	2,2857
Trigo (blando)	1,2299	64,346	2,5558
Yuca	0,2892	64,3551	1,7267
Cacao	4,1942	0,0	2,7296

Fuente: ASAE⁴ (1981); BACH (1979); SILVA (1979); FIOREZE (1982).

La Tabla 2.5 muestra los valores de los parámetros empíricos de la ecuación de Chung-Pfost respecto de diversos productos.

Métodos experimentales para obtener el equilibrio higroscópico

Hay dos métodos para la obtención experimental de contenidos de humedad de equilibrio: el estático y el dinámico. En el método estático, las muestras se colocan en recipientes con humedad relativa y temperatura controladas, hasta que alcancen el equilibrio higroscópico, sin que haya movimiento de aire. Existe también otro método estático, en que una muestra de granos relativamente grande se coloca en un recipiente herméticamente cerrado dotado de un dispositivo higrosensor para determinar la humedad relativa. Cuando se alcanza el equilibrio higroscópico, no se producen variaciones apreciables en los valores de humedad relativa en el aire intersticial.

Tabla 2.5 Parámetros de la ecuación de Chung-Pfost respecto de diversos productos

Producto	d ₁	d ₂	d ₃	d ₄	d ₅
Cebada	0,38363	0,050279	91,323	761,66	19,889
Frijol comestible	0,43001	0,062596	160,629	962,58	15,975
Maíz	0,33872	0,058970	30,205	312,30	16,058
Maní en grano	0,18948	0,034196	33,892	254,90	29,243
Maní con cáscara	0,16510	0,026383	12,354	522,01	37,903
Arroz con cáscara	0,29394	0,046015	35,703	594,61	21,732
Sorgo	0,35649	0,050907	102,849	1099,67	19,644
Soja	0,41631	0,071853	100,288	328,30	13,917
Trigo (durum)	0,37761	0,055318	112,350	921,65	18,077
Trigo (duro)	0,35616	0,056788	50,998	529,43	17,609
Trigo (blando)	0,27908	0,043360	35,662	726,49	23,607

Fuente: ASAE (1981)

Diversas sustancias químicas poseen la característica de retirar o ceder humedad del ambiente en que se encuentran, hasta que se alcanza un estado de equilibrio. Las sustancias que así se comportan se denominan materiales higroscópicos, y el contenido de humedad, cuando están

⁴ ASAE: American Society of Agricultural Engineers

en equilibrio con la atmósfera circundante, se conoce como contenido de humedad de equilibrio.

El método dinámico consiste en hacer pasar el aire, con humedad relativa y temperatura controladas, a través de la muestra, o vice versa, hasta que no haya variación de masa en la muestra. Este método permite obtener el equilibrio higroscópico en un lapso inferior al que necesita el método estático, en las mismas condiciones de temperatura y humedad relativa.

El estado de humedad relativa se puede mantener constante al interior de recipientes herméticamente cerrados, con soluciones de ácido sulfúrico, ácido clorhídrico y etilen glicol, las que mantendrán la humedad relativa constante en cualquier valor que se desee; sólo basta con variar la concentración. Se pueden emplear también soluciones saturadas de diferentes sales, las que han sido preferidas por muchos autores por las ventajas siguientes:

a) la misma solución de sal se puede usar con diversas temperaturas, sin grandes variaciones en el valor de la humedad relativa; b) las sales son menos corrosivas que los ácidos y causan menos daño a los operadores durante su manejo; y c) aunque el material higroscópico pierda o gane humedad en cantidades relativamente grandes, la solución permanece saturada, siempre que se deje un depósito de cristales de sal en el fondo de la solución.

Un inconveniente es la dificultad de encontrar sales que abarquen toda la gama de humedad relativa que interesa. En las Tablas 1 y 2 de Anexos, aparecen los datos de humedades relativas, en función de la temperatura, que se mantienen con soluciones de diversas sales.

2.2.2.3 Entalpía de vaporización

La entalpía de vaporización se define como la energía necesaria para que una unidad de masa de una sustancia pase del estado líquido al estado gaseoso. Si se trata de productos biológicos, tales como los granos, se define como la cantidad de energía necesaria para evaporar una unidad de masa de agua contenida en el producto.

Con la aparición de los modelos matemáticos de secado, la determinación de una ecuación para la entalpía de vaporización del agua de los granos creció en importancia, ya que se trata de una de las propiedades del producto que se usa en los modelos existentes.

Las isotermas de sorción del agua de los productos biológicos proporcionan los datos necesarios para calcular la entalpía de vaporización. La entalpía de vaporización del agua de un producto determinado depende, sobre todo, de la temperatura y del contenido de humedad que presenta dicho producto. Cuanto mayor sea el contenido de humedad, menor será la cantidad de energía necesaria para evaporar una unidad de masa de agua contenida en un producto, y viceversa.

Por lo dicho en base a las isotermas de sorción se obtiene la ecuación para determinar la entalpía de vaporización del agua en el grano mediante la siguiente expresión:

$$\frac{L_v}{L'_v} - 1 = a \cdot \exp(-bH) \quad (2.11)$$

Donde

L_v = Entalpía de vaporización del agua en el grano (kJ/kg)

L'_v = Entalpía de vaporización del agua libre (kJ/kg)

Aplicando la metodología presentada por OTHMER (1940) para obtener la entalpía de vaporización de otros productos, se obtienen los coeficientes a y b de la ecuación 2.11, que aparecen en la Tabla 2.6.

Tabla 2.6 Parámetros a y b de la ec. (2.11) respecto de diversos productos

Producto	a	b
Arroz en cáscara	2,1274	21,6100
Soja	0,3240	13,9170
Cebada	0,8627	19,8890
Sorgo	1,0452	19,6440
Trigo (duro)	1,3069	17,6090
Fréjol	0,4542	15,9750

2.2.3 SISTEMAS DE SECADO

Los secadores de granos se pueden clasificar acuerdo con diversos criterios, tales como el flujo del producto en el secador y la temperatura de secado. La elección de uno de estos criterios

depende del enfoque que se quiera dar al asunto. En el caso presente, los secadores se clasificarán según el flujo del producto, como sigue:

a. Estacionarios:

- a.1. Secador de lecho fijo o de capa estacionaria.
- a.2. Secador con aire movido por convección natural.

b. Continuos:

- b.1. En cascada o de canaletas.
- b.2. De flujos cruzados.
- b.3. De flujos concurrentes.
- b.4. De flujos contrarios.

c. Intermitentes.

d. Sistemas de vacío

a. Secadores Estacionarios:

a.1. Secador de lecho fijo o de capa estacionaria

Los secadores de lecho fijo se componen de cuatro elementos principales que se observan en la **Figura 2.10**: sistema de calentamiento del aire, ventilador, cámara de distribución del aire o "plenum", y cámara de secado.

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 haya contaminaciones de él 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 calentado, 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.

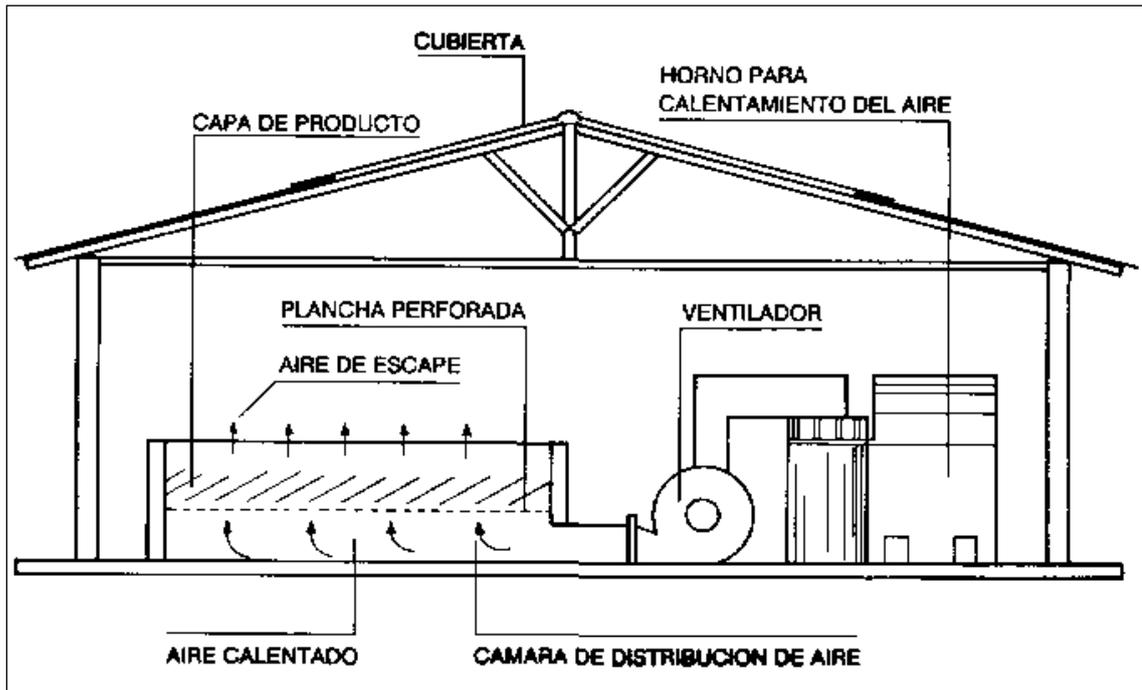


Figura 2.10 Esquema del secador de lecho fijo

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.

a.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.

b. Secadores Continuos:

b.1 Secadores en cascada o de canaletas

Los secadores en cascada se componen de una serie de canaletas invertidas, en forma de V, dispuestas en filas alternadas o cruzadas dentro del cuerpo del secador, con intervalos de 0,30 m., aproximadamente. Los granos bajan por acción de la gravedad y caen sobre las canaletas invertidas. El aire de secado entra por una fila de canaletas y sale por las otras inmediatamente adyacentes (superior e inferior). De este modo, al bajar por el secador, los granos se mueven tanto en el mismo sentido que el aire, como en sentido contrario. En la **Figura 2.11** aparece un esquema de distribución de canaletas alternadas, en secadores de tipo cascada, y en la **Figura 2.12** hay un esquema de secador de canaletas cruzadas.

Los secadores en cascada, se cuentan entre los primeros modelos de secadores continuos que se usan comercialmente. En los países desarrollados se les ha ido reemplazando paulatinamente, por su elevado costo inicial, problemas de contaminación y problemas de manejo.

El principal inconveniente de los secadores en cascada es el elevado costo inicial; la cantidad de material que se necesita para confeccionar las canaletas es el factor que más contribuye a elevar los costos.

Los secadores en cascada se consideran contaminantes de ambiente por la velocidad relativamente alta que tiene el aire a la salida de los ductos. En consecuencia, las impurezas más livianas que se encuentran en la masa de granos son arrastradas al exterior del secador. En los países desarrollados, las leyes más rigurosas en ese campo han obligado a los fabricantes a instalar filtros a la salida del aire de estos secadores, en cumplimiento de las normas de control de la contaminación ambiental.

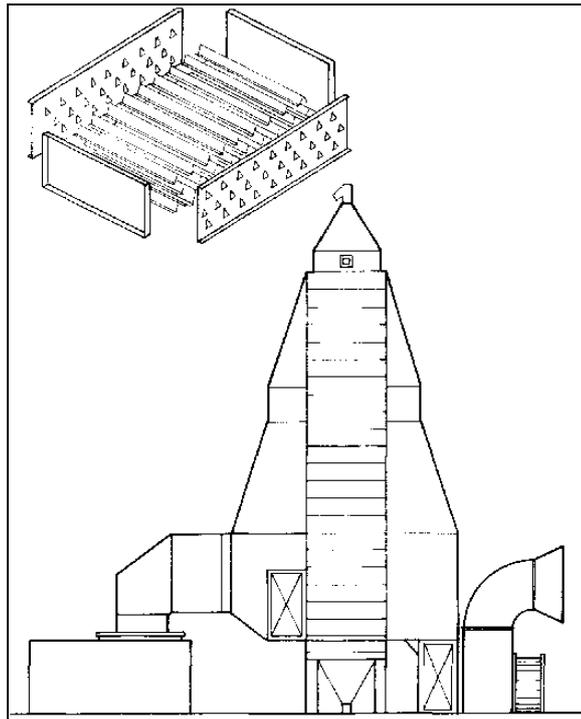


Figura 2.11 Esquema de distribución de canaletas paralelas en secadores de tipo cascada.

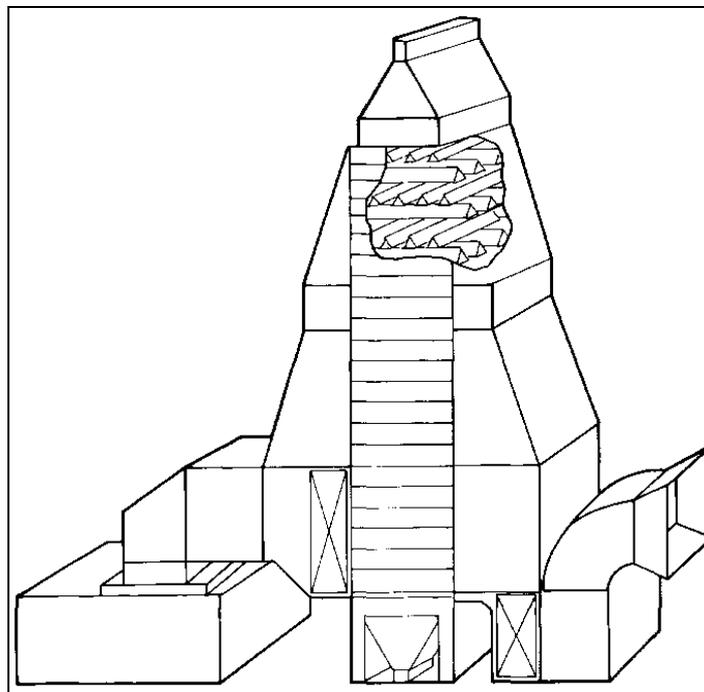


Figura 2.12 Esquema de distribución de canaletas en un secador de canaletas cruzadas (KREYGER 1972).

b.2 Secador de flujos cruzados

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, fijo a una fundación permanente.

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 2.13** se presentan esquemas de estos tipos de secadores.

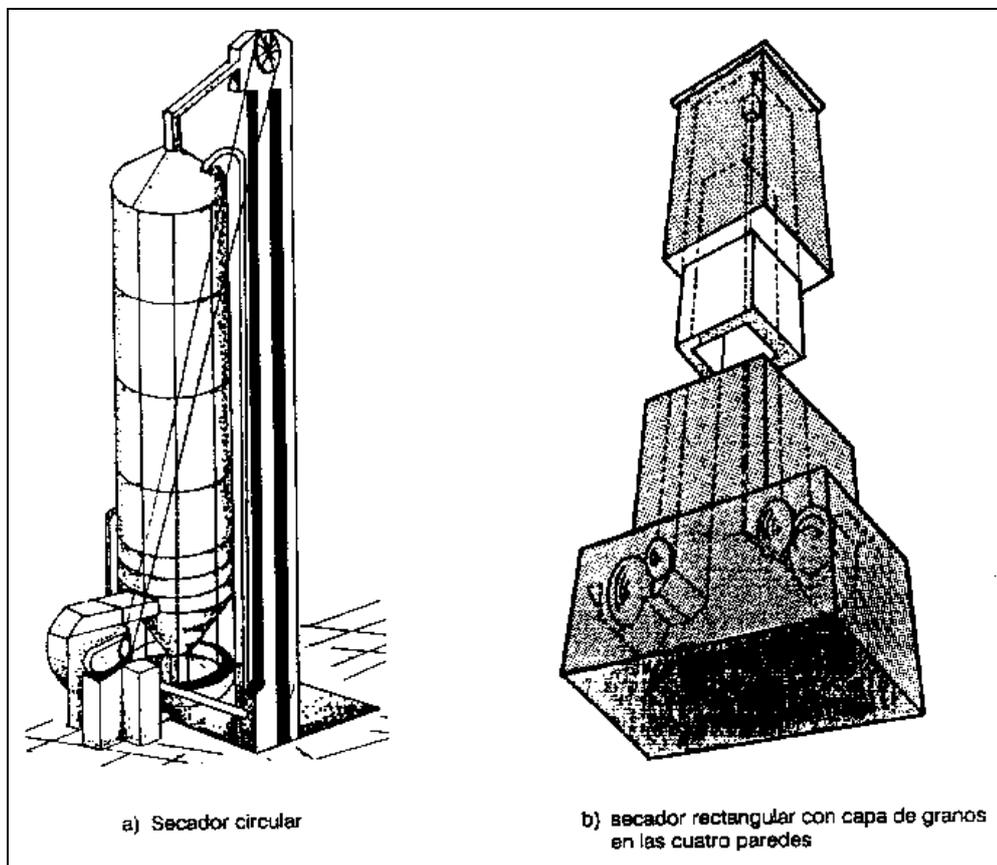


Figura 2.13 Esquemas de secadores de flujos cruzados de tipo torre

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. 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. 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.

b.3 Secador de flujos paralelos

En un secador de flujos paralelos, aire y granos fluyen en la misma dirección. Hay altas tasas de evaporación en la parte superior de la capa de granos, donde el aire caliente se encuentra con los granos más húmedos. Los intercambios intensos y simultáneos de energía y masa a la entrada de aire o de granos, causan un rápido descenso de la temperatura inicial del aire de secado, así como en el contenido de humedad de los granos. Por este motivo, la temperatura del producto permanece muy por debajo de la temperatura inicial del aire de secado. Dichas temperaturas alcanzan valores muy próximos, a medida que el aire y el producto se mueven hacia abajo por el secador. En consecuencia, el potencial de secado disminuye, en virtud de la reducción de temperatura del aire y del aumento de su humedad relativa, con el consiguiente aumento de la humedad de equilibrio del producto. En la **Figura 2.14** se ve un esquema de un secador de flujos paralelos.

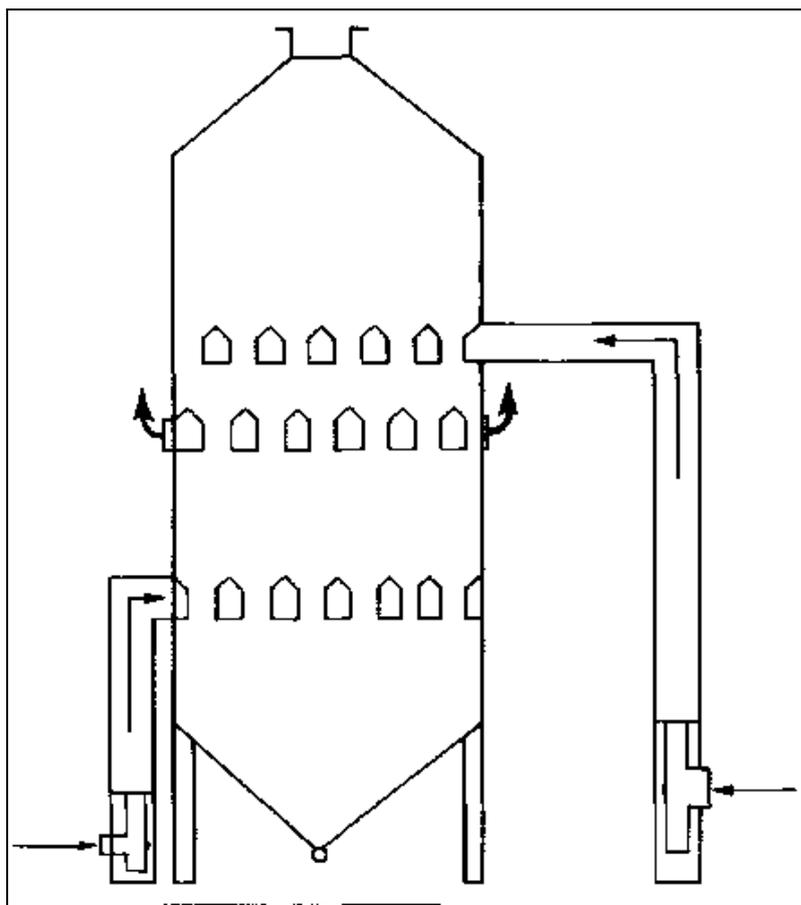


Figura 2.14 Esquema de secador de flujos paralelos.

En el secador de flujos paralelos todos los granos se someten al mismo tratamiento de secado. En consecuencia, no hay diferencia de humedad entre los granos, como sucede con los secadores de flujos cruzados. La reducción continua de la temperatura del aire, hasta la parte inferior de la cámara de secado, alivia la tensión impuesta a los granos durante el secado y disminuye la tendencia a los daños mecánicos durante el transporte posterior.

b.4 Secador de flujos contracorrientes

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 2.15** hay un esquema de dicho sistema de secado.

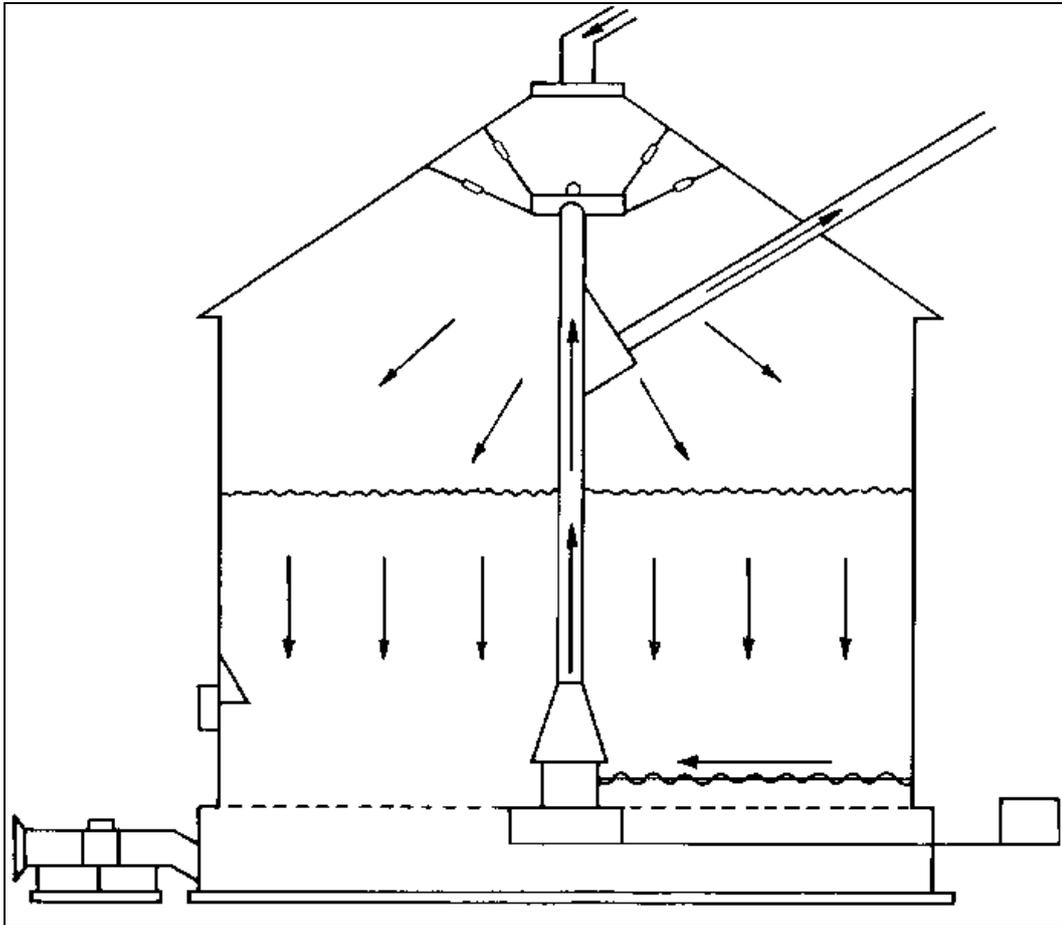


Figura 2.15 Secado en flujos contrarios, en silos.

c. Secadores intermitentes:

Los secadores continuos ya descritos se pueden usar como secadores intermitentes. Para ello, basta que el producto, al salir del secador, vuelva a entrar a él, ya que estos secadores no retiran la humedad deseada del producto en una sola pasada y exigen que aquél pase más de una vez por el secador.

Hay secadores hechos para el secado intermitente, los cuales poseen en su parte superior una cámara de reposo para los granos. En estos secadores, los granos permanecen en la cámara de reposo cerca de 90% del tiempo total y solamente el 10% en contacto con el aire de secado. El propósito de la permanencia más prolongada en la cámara de reposo es que haya redistribución de humedad en los granos, lo que facilita el secado posterior. Al mismo tiempo, debido al breve periodo en que los granos quedan expuestos al aire de secado, la eliminación de humedad de los granos en cada pasada por la cámara de secado es pequeña y exige un elevado número de pasadas. En la **Figura 2.16** aparece el esquema de un secador intermitente de flujos cruzados.

Ciertos productos agrícolas no soportan el secado continuo hasta alcanzar el contenido de humedad final que se busca, sin sufrir considerables daños físicos y fisiológicos. Es el caso de las semillas en general, del arroz y de los productos que se cosechan con humedad muy elevada. Estos productos se deben secar de manera intermitente.

Cuando el producto no está destinado a semilla, con excepción del arroz, la temperatura del aire de secado intermitente es la misma que se usa en los procesos continuos.

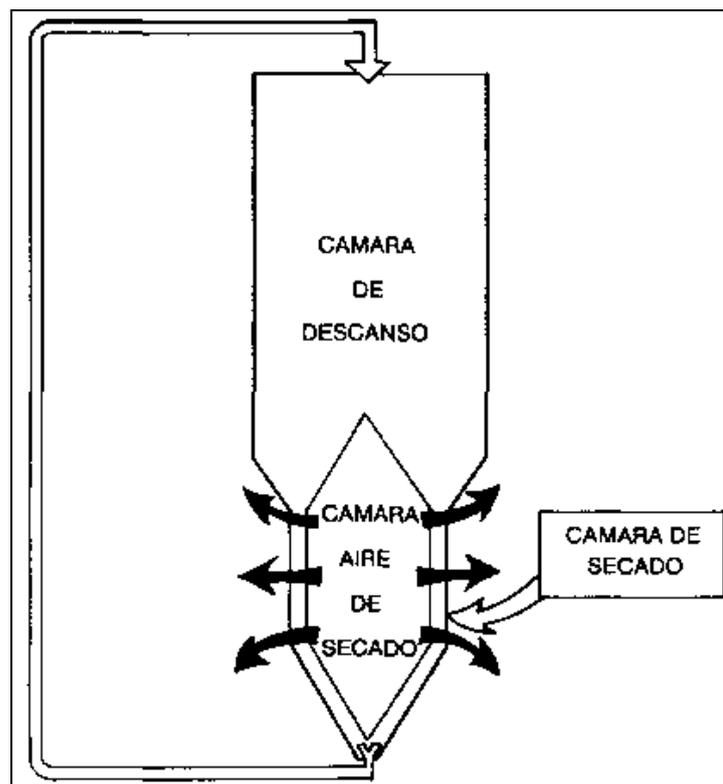


Figura 2.16 Esquema de un secador intermitente de flujos cruzados.

d. Sistema Secado al vacío

La tecnología de vacío permite alcanzar rangos de presión menor que la atmosférica lo que brinda la ventaja de disminuir las temperaturas de operación en el proceso de secado ya que a una menor presión se tiene una menor temperatura de vaporización del agua contenida en el grano lo que implica un menor ingreso de energía y por tanto una reducción del consumo de combustible y por ende conlleva un ahorro económico.

En este tipo de tecnología la transferencia de calor y pérdidas por convección son mínimas, frente al flujo de calor por conducción o radiación, razón por la cual se ha escogido este sistema como el adecuado de trabajo.

2.2.4 FUENTES DE ENERGÍA

El calentamiento destinado al secado de productos agrícolas tiene como principales fuentes de energía:

- a) Los combustibles, tales como la leña, los residuos agrícolas y los derivados del petróleo.
- b) La energía eléctrica, por medio de resistencias eléctricas.
- c) La captación de energía solar.

2.2.4.1 Combustibles

Las sustancias que se pueden quemar, liberando calor, se llaman combustibles. La principal característica combustible es su poder calorífico. El poder calorífico de un combustible es la cantidad de energía que se produce en la combustión completa de una unidad de masa o de volumen. El poder calorífico depende de las características químicas del combustible y se clasifica como superior (Hs) e inferior (Hi). El poder calorífico superior tiene en cuenta el calor que proviene de la condensación del vapor de agua presente en los productos de combustión; el poder calorífico inferior no tiene en cuenta ese calor.

Por el hecho de que el agua está contenida en los productos de combustión en estado de vapor, se usa generalmente el poder calorífico inferior, al que también se conoce como líquido o práctico. En la Tabla 2.10 aparecen los valores de algunos combustibles.

Tabla 2.7 Poder calorífico Inferior (Hi) de algunos combustibles por metro cúbico en condiciones normales de temperatura y presión

Combustibles	Hi	
	kJ/kg	kJ/m ³
Alcohol Etílico	24388	
Bagazo de caña	9200 a 13800	
Biogás		17086
Caña de maíz		
20 % de humedad	13400	
Carbón mineral		
- antracita	21673 a 32312	
- lignito	14666 a 19322	
Carbón vegetal	27450	
Cáscara de arroz	16218	
Gas de gasógeno		5200
Gas natural		29313 a 70641
Gasolina	44000	
GLP		49000 a 50150
Leña 20% de humedad 50% de humedad	15412 8715	
Petróleo diesel	47725	
Querosén	43091	
Cáscara de babaco	16720	

Fuente: CLAAR II et al. (1981)

a) Combustibles líquidos

El petróleo es una sustancia oleaginosa constituida por una mezcla de compuestos orgánicos (hidrocarburos). El petróleo crudo no tiene utilización práctica, pero luego de su destilación se obtienen subproductos tales como la gasolina, el querosén, el petróleo diesel y el petróleo combustible, los cuales, pese a ser combustibles excelentes, en algunos países no son de uso general en el secado de granos, por su elevado costo.

El petróleo de esquisto se asemeja al petróleo y se obtiene de ciertas rocas petrolíferas llamadas esquistos. El alcohol etílico es una sustancia que se obtiene por la destilación del caldo fermentado de varias materias primas, principalmente caña de azúcar, mandioca y betarraga, etc. Es un producto renovable, al contrario del petróleo y los esquistos.

b) Combustibles gaseosos

Los combustibles gaseosos se obtienen de la mezcla de gases. Entre ellos, se cuentan el gas licuado de petróleo (GLP) y el gas natural. Por ser subproductos del petróleo, en varios de los países en desarrollo el uso de estos combustibles en el secado de productos agrícolas está bastante limitado por razones económicas.

El biogás derivado de la fermentación de residuos orgánicos no está indicado para el secado de granos, porque el biodigestor tendría que ser de dimensiones muy grandes para atender la demanda energética en el proceso de secado.

El gas de gasógeno es un gas pobre, producto de la combustión incompleta de combustibles y sendos, tales como el carbón vegetal y la leña. El gas resultante contiene monóxido de carbono e hidrógeno como sustancias combustibles. Este gas se puede usar como combustible para mover motores estacionarios, los cuales impulsan ventiladores.

2.2.4.2 Combustión

La combustión es el conjunto de reacciones químicas exotérmicas en las que interviene el oxígeno, produciendo energía aprovechable, luego de que el combustible se calienta hasta la temperatura de ignición. En la Tabla 2.11 aparecen las temperaturas de ignición de algunos combustibles, al nivel del mar.

La temperatura de ignición es aquella a la cual la energía que se genera en la reacción es superior a la energía que se pierde en el ambiente, lo cual permite mantener la combustión. La temperatura de ignición depende de la presión ambiental, del comburente (aire u oxígeno puro) y del combustible que se emplee.

Tabla 2.8 Temperaturas de ignición al nivel del mar

Combustible	Temperatura (°C)
Carbón mineral	
- antracita	500
- lignita	250-450
Carbón vegetal	240-400
Etano	470-630
Gas de gasógeno	700-800
Gasolina	266-427
GLP	500
Madera (seca)	300
Metano	640-750
Monóxido de carbono	655
Coque	700

Fuente: DINIZ (1981)

2.3 SISTEMA ADECUADO DE TRABAJO

El sistema de secado al vacío permite crear un ambiente controlado de operación, reduciendo los tiempos de secado y optimizando el proceso, razón por la cual se ha escogido este mecanismo con las características señaladas a continuación:

De acuerdo con la definición de la Sociedad Americana de Vacío (1958), el término vacío se refiere a cierto espacio lleno con gases a una presión total menor que la presión atmosférica,

por lo que el grado de vacío se incrementa en relación directa con la disminución de presión del gas residual. Esto significa que en cuanto más disminuyamos la presión, mayor vacío obtendremos, lo que nos permite clasificar el grado de vacío. Entonces, podemos hablar de bajo, mediano, alto y ultra alto vacío, en correspondencia con intervalos de presiones cada vez menores. Cada intervalo tiene características propias.

- 1) Bajo y mediano vacío. El intervalo de presión atmosférica con estas características se manifiesta desde un poco menos de 760 Torr hasta 10^{-2} Torr. Con las técnicas usuales para hacer vacío (que se describen más adelante), los gases que componen el aire se evacúan a diferentes velocidades y esto altera la composición de gases del aire residual.
- 2) Alto vacío. El intervalo de presión se extiende desde cerca de 10^{-3} Torr hasta 10^{-7} Torr. La composición de gases residuales presenta un alto contenido de vapor de agua (H_2O).
- 3) Ultra alto vacío. El intervalo de presión va desde 10^{-7} hasta 10^{-16} Torr. Las superficies internas del recipiente se mantienen limpias de gas. En este intervalo el componente dominante de los gases residuales es el hidrógeno.

2.3.1 APLICACIONES PRÁCTICAS DEL VACÍO

Existen diversas razones prácticas por las que es conveniente hacer vacío, a continuación referimos algunos casos:

- 1) La tecnología de vacío es utilizada para extraer la humedad de los alimentos, químicos, productos farmacéuticos y los gases ocluidos (disueltos) en aceites plásticos, y otros líquidos.
- 2) La producción de jugo de frutas y leche concentrada, son ejemplos de producciones a gran escala basadas en la concentración en vacío, para lo cual no se requiere de alta temperatura para evaporar el agua o solventes contenidos en los productos.
- 3) Para modificar una cierta condición de equilibrio que existe en condiciones ambientales normales, como para remover gas disuelto u ocluido o líquido volátil de la parte interna de un material, por ejemplo, en procesos de secado al vacío.

2.3.2 CLASIFICACIÓN DE LAS BOMBAS DE VACÍO

Tabla 2.9 Historia de las bombas de vacío

<i>Año</i>	<i>Autor</i>	<i>Descubrimiento</i>
------------	--------------	-----------------------

Siglo VIII	Hauskbee y Nollet	Mejoras a la bomba de Von Guericke
1850	Geissler y Toepler	Bomba de columna de Hg
1865	Sprengel	Bomba de gota de Hg
1905	Wolfgang Gaede	Bomba de vacío o rotatoria
1913	Wolfgang Gaede	Bomba molecular de vacío
1915	Wolfgang Gaede	Bomba de difusión
1916	Irving Langmuir	Condensación-difusión
1923	F. Holweck	Bomba molecular
1935	Wolfgang Gaede	Bomba de balastra
1936	Kenneth Hickman	Bomba de difusión de aceite
1953	Schwartz y Herb	Bomba iónica
		Bomba criogénica

Fuente: <http://omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/html/fisica.html>.

La tecnología actual del vacío permite obtener rangos que van desde casi la presión atmosférica hasta 10^{-13} torr mediante una gran variedad de sistemas de bombeo. El dispositivo conveniente para hacer vacío depende de cuál sea la aplicación que se le quiera dar.

2.3.2.1 Parámetros y Clasificación de las Bombas de Vacío

La selección de la bomba de vacío que va a emplearse para un cierto proceso está definida por sus parámetros específicos, los cuales determinan sus propiedades. Los parámetros más importantes de los sistemas de vacío son: la presión más baja que puede lograr, el intervalo de presión, la velocidad de bombeo, la presión de descarga y el gas residual. Un ejemplo de la utilización de bombas en un sistema típico de alto vacío se ilustra en la **Figura 2.19**

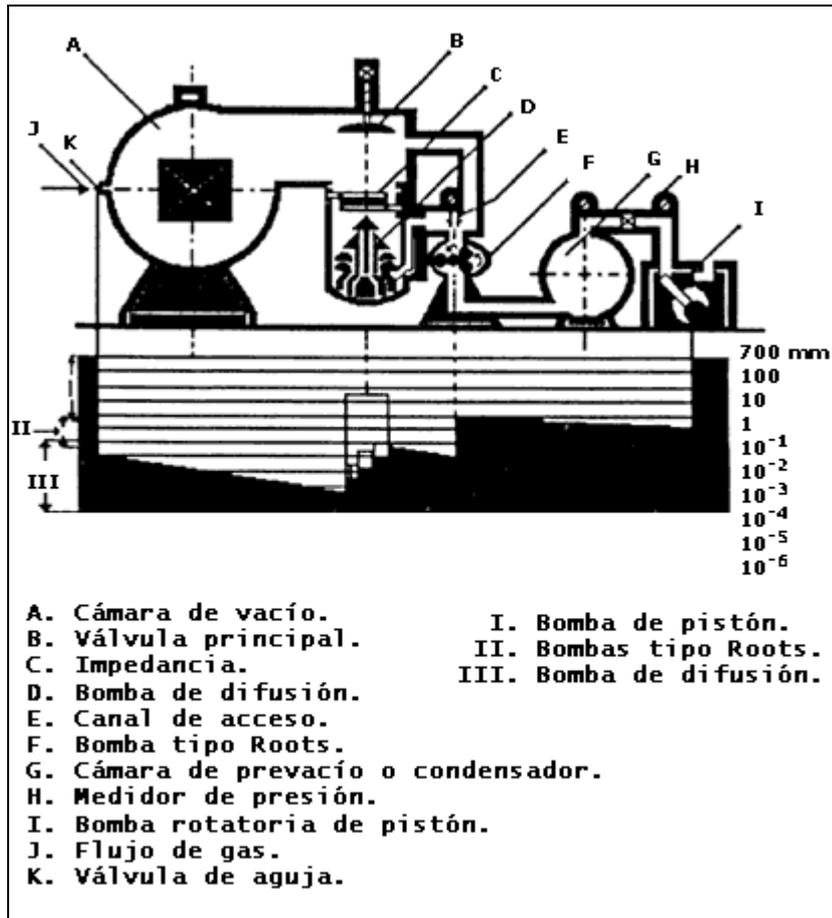


Figura 2.17 Sección transversal esquemática de un sistema industrial de vacío.

Por otra parte, la clasificación de las bombas de vacío se presenta en la Figura 2.18 de acuerdo con su intervalo de presión.

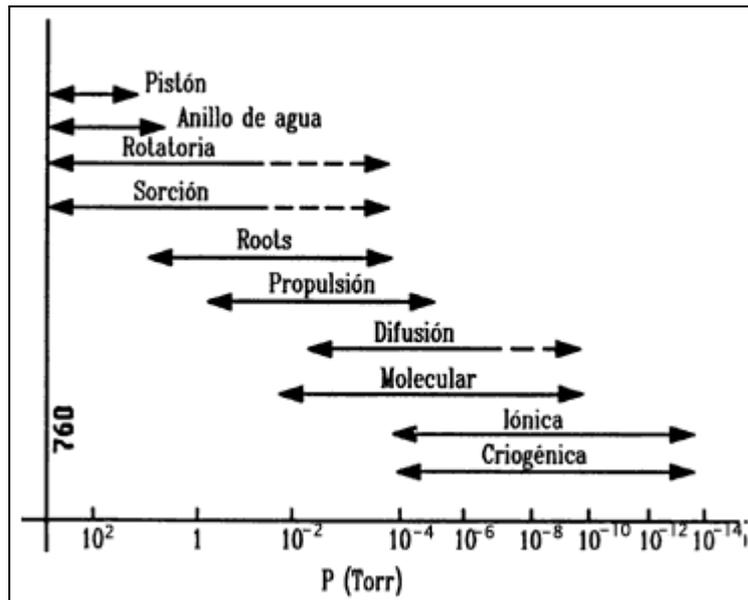


Figura 2.18 Rangos de presión para bomba de vacío.

2.3.3 DISPOSITIVOS DE MEDICIÓN DE VACÍO

En la selección de un medidor de presión es importante considerar de antemano el tipo de sistema con el cual se cuenta, el trabajo a realizarse, y las condiciones necesarias para medir la presión. Una manera sencilla de elegir el medidor adecuado a nuestros propósitos es tomar en cuenta los siguientes cinco puntos:

- 1) El intervalo de presión para el cual es requerido el medidor.
- 2) ¿Qué es importante saber?, la presión parcial de cada componente del gas o la presión total.
- 3) Considerar si la lectura del medidor depende del tipo de gas existente en la cámara.
- 4) La exactitud necesaria al medir.
- 5) El tipo de montadura del medidor.

Para dar una idea de la variedad de medidores que existen y los diferentes intervalos de presión en que trabajan, en la **Figura 2.18** presentamos una gráfica con tales datos.

En general, se acostumbra llamar barómetros a los instrumentos que sirven para medir la presión atmosférica, y manómetros a los que miden la presión de cualquier gas o vapor.

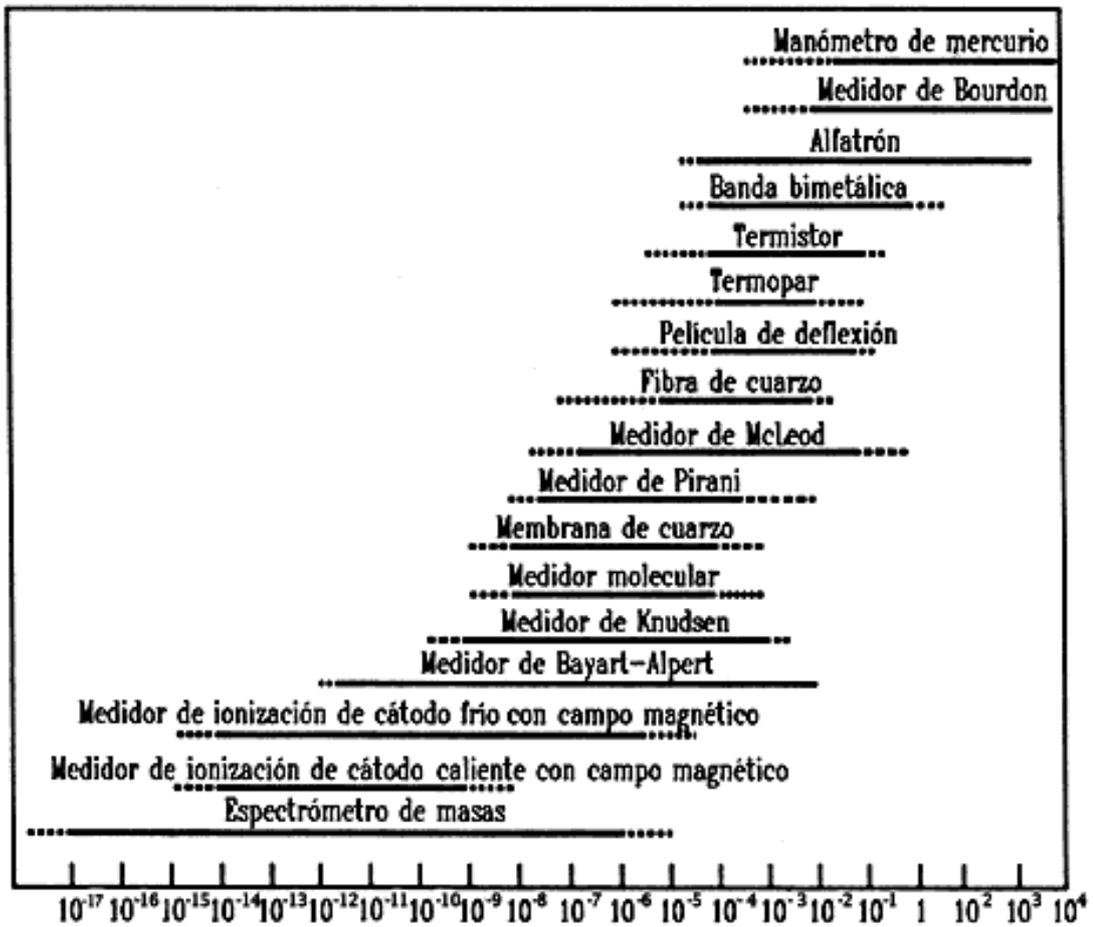


Figura 2.19 Intervalos de presión en los medidores de vacío.

2.3.4 COMPORTAMIENTO DE LOS MATERIALES EN EL VACÍO

Degasamiento: Este término indica la evolución natural de gases absorbidos (moléculas de gas dentro de un material) o absorbidos (adhesión de moléculas de gas a la superficie del material) en vacío, y puede provenir de tres fuentes diferentes: evaporación (o descomposición química), desorción de superficies, y difusión fuera del material. Todos estos pasos elementales forman una reacción química sobre una superficie. El degasamiento es, en este caso, una de las interacciones entre una superficie y un gas (Figura 2.20).

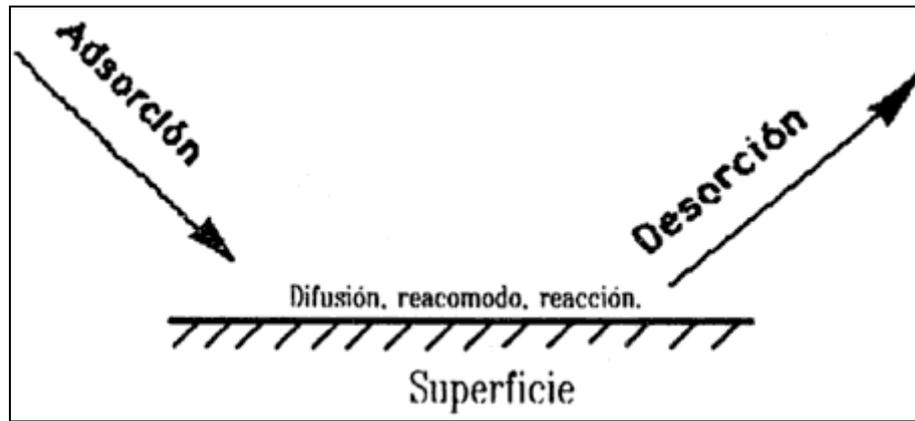


Figura 2.20 Esquema de procesos elementales durante las interacciones gas-superficie.

Se pueden calcular las proporciones de evaporación (cambio de fase de sólido o líquido a vapor) y equilibrio de la presión de vapor de los metales elementales a partir de relaciones termodinámicas.

Las proporciones de evaporación para aleaciones no son predecibles como en el caso de los elementos simples, aunque las proporciones de evaporación de los metales que componen la aleación nos dan una base de estimación. En la fabricación de equipo para alto vacío se usan metales que tienen una baja presión de vapor; los más utilizados son el acero inoxidable, el cobre, el bronce, el acero y el aluminio.

El proceso de desorción de la superficie es la expulsión de una molécula adsorbida en la superficie, con lo cual se propicia el degasamiento del material.

La difusión fuera del material es la emigración de átomos o moléculas adsorbidas a lo largo de una superficie hasta que abandonan dicho material.

Permeabilidad. La permeabilidad de un material es una medida de la cantidad de gas (a una temperatura dada) que podrá difundirse a través de él por unidad de tiempo. Hasta hoy, no es posible obtener un valor absoluto de permeabilidad para cada material, ya que es afectada por las diferencias de presión, temperatura, pureza y las condiciones de superficie del material. Para determinar la permeabilidad en los materiales se hacen exámenes en condiciones ambientales controladas.

Propiedades de adhesión (pegamento). Para unir las componentes y formar un sistema de vacío, es necesario considerar el tipo de materiales que nos pueden servir para soldar, fundir o enlazar de manera que no tengamos una reacción química desfavorable en nuestro sistema. En general, para obtener un vacío óptimo lo que se pretende es no tener fugas (entradas de aire).

Economía. Los costos son un factor fundamental al considerar los materiales con los que fabricaremos un sistema de vacío, ya que existen materiales de bajo costo inicial, pero de alto costo al procesarlos, lo que los hace totalmente incosteables.

Los materiales usados con más frecuencia en las técnicas de vacío se presentan en la siguiente clasificación:

Generales

- 1) **Acero.** El acero templado es un acero sin tratamientos térmicos y de bajas concentraciones de carbón. Estos tipos de acero templado con bajo contenido de azufre son usados con frecuencia en sistemas de vacío. Se encuentran disponibles en diferentes formas y pueden ser unidos, fundidos o soldados. Se utilizan en los sistemas de vacío por su baja presión de vapor y como recubrimiento en las bombas de mercurio, ya que no es afectado por el vapor de Hg. Sin embargo puede ser afectado por la corrosión debido a la adsorción de vapor de agua.
- 2) **Acero inoxidable.** Es más resistente a la corrosión que el acero. Es una aleación de cromo y acero y se emplea en forma de tubos, platos, cámaras y extensiones. Para trabajos de vacío no es recomendable el acero inoxidable de la serie 303 ya que contiene azufre. Por otra parte, la serie 300 es muy utilizada en sistemas de ultra alto vacío; su conductividad térmica y eléctrica es baja, no es magnético, y las temperaturas a que se exponen los sistemas de este tipo no deben de exceder los 1 000°C, porque el cromo se comienza a evaporar a los 1 200°C.
- 3) **Aluminio.** Es de poco peso, fuerte, resistente a la corrosión con una baja presión de vapor, barato, fácil de trabajar, y fácilmente obtenible en las formas más comunes, como tubos, hojas, barras, etcétera.
- 4) **Bronce.** Es esencialmente una aleación de cobre y estaño. Es fácil de trabajar y con él se construyen algunas válvulas.
- 5) **Cobre.** Ocasionalmente se usa para electrodos no magnéticos, sirve también para sellos anulares de vidrios y bridas. Tiene una densidad de 8.8 a 8.9 g/cm³. Su punto de fusión es de 1083°C.
- 6) **Vidrio.** El vidrio más comúnmente usado en los laboratorios de sistemas de vacío es un borosilicato conocido como Pyrex. Se construyen envases, cámaras, ventanas, etc.

Metales especialmente refractarios

- 1) **Molibdeno.** Tiene un punto de fusión alto (2 620°C), por ello se usa con frecuencia para filamentos, botes, y depósitos en los cuales el material será evaporado al vacío. Otro uso es para bombear metal activo a muy bajas presiones. El molibdeno se oxida con rapidez cuando se calienta en el aire.
- 2) **Tungsteno.** Su punto de fusión está catalogado como el más alto de cualquier metal (3 382°C). Es difícil de trabajar, pero se encuentra disponible en hojas y alambres que pueden ser procesados en frío para tiras de calentadores y filamentos. El tungsteno se oxida rápidamente cuando es calentado en la atmósfera, y emite electrones a temperaturas superiores a los 2 000°C. Se usa con frecuencia como filamento en los medidores de presión por ionización, electrodos y anticátodos para tubos de rayos X. Tiene una densidad de 19-19.4 g/cm³.
- 3) **Tántalo.** Es más dúctil que el molibdeno y el tungsteno pero más costoso. Resiste el ataque de ácidos y se utiliza en la construcción de botes, chalupas y filamentos para depósito de películas delgadas en vacío, además de calentador de elementos en vacío y actúa como colector de los 600 a los 1 000°C. Tiene un punto de fusión de 2 996°C.

Cerámicas

Las cerámicas son usadas como aislantes térmicos o eléctricos en altas temperaturas. Se emplean para sostener piezas que van a calentarse en la construcción de cámaras para alto vacío. También son aislantes en las tapas de acero de las cámaras, donde se colocan las barras de metal que atraviesan la cámara conectando el interior de la misma con el exterior.

Los tipos de cerámica más usados en sistemas de vacío son: alúmina, porcelana, lava y zafiro. A continuación se da una descripción breve de estos tipos de cerámica.

- 1) **Zafiro.** Es la presentación más pura del óxido de aluminio. Se puede obtener en forma transparente para usarse como ventanas en sistemas de vacío, las cuales se pueden exponer a temperaturas de 1 900°C. La transmisión infrarroja del zafiro es mejor que la de otros materiales. El zafiro es producido en forma de monocristales y puede ser sellador de vidrio.
- 2) **Porcelana.** Contiene tres ingredientes principales: arcilla, pedernal y feldespato; variando las proporciones de estos materiales, cambian ciertas propiedades de la cerámica, como su resistencia a choques térmicos, resistencia dieléctrica o mecánica. La porcelana se encuentra disponible en diámetros y longitudes estándar con roscas de tornillo en las puntas. La temperatura máxima a la cual opera la porcelana es cercana a los 1 000°C.
- 3) **Lava.** Cerámica hecha de talco natural, puede operar a temperaturas entre los 1 000 y 1 200°C.

Otro tipo de materiales importantes en la tecnología de vacío son los plásticos y los cauchos. Para los plásticos se consideran las condiciones a las que serán expuestos, la cantidad de uso ha de dárseles, cómo y dónde se emplearán, la temperatura a la que estarán expuestos y si formarán una parte permanente o temporal en el sistema. Algunos plásticos especiales que tienen una alta presión de vapor son los acrílicos y los fluorocarbonos.

Los cauchos se dividen en caucho natural y caucho sintético. Algunos de los cauchos sintéticos son: nitrilo, neopreno, butil y GR-S.

2.3.5 ESQUEMA DEL SISTEMA DE SECADO

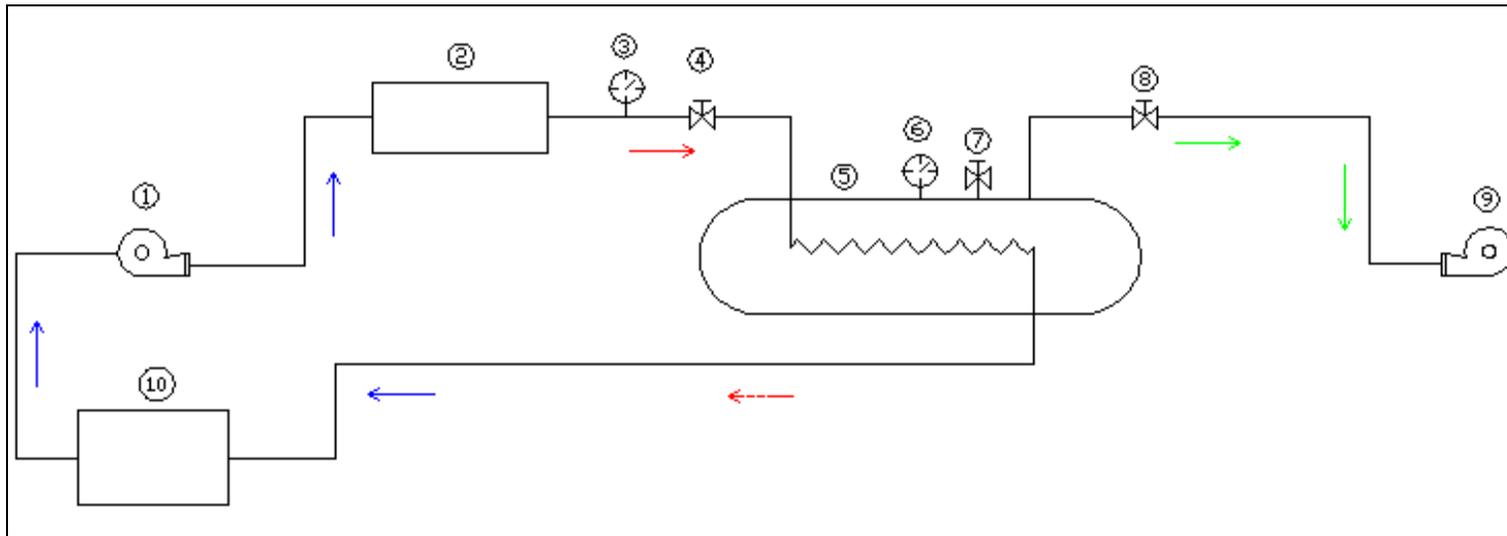


Figura 2.21 Esquema del Prototipo de Secado de arroz al Vacío

Tabla 2.10 Descripción del flujo

	Flujo de agua a condiciones de almacenamiento
	Flujo de agua caliente
	Flujo de agua caliente a la salida del recipiente
	Flujo de aire extraído de la cámara de vacío

(*) Descripción de los elementos numerados se encuentran en la Tabla 2.11

Tabla 2.11 Descripción de las partes del Prototipo

Ord.	Descripción
1	Bomba
2	Unidad de Calentamiento
3	Termómetro
4	Válvula de Paso
5	Recipiente al Vacío
6	Vacuómetro
7	Válvula de Paso
8	Válvula de Paso
9	Bomba de Vacío
10	Reservorio

2.3.5.1 Descripción del Proceso de Secado al Vacío

Etapa de Flujo de Agua:

Se succiona agua desde el reservorio (10) por medio de la bomba (1) hacia la unidad de calentamiento (2) donde alcanza el estado requerido para evaporar el agua contenida en el grano, posteriormente el agua ingresa a los serpentines ubicados en el interior del recipiente al vacío (5), en donde se realiza la transferencia de calor hasta alcanzar las condiciones de humedad requeridas en el grano (Humedad de base seca, Hbh = 12%).

Etapa del secado de grano

El ingreso del grano en condiciones iniciales al recipiente se lo realiza por medio de bandejas las cuales se ubican sobre los serpentines, luego se procede a cerrar herméticamente el recipiente para extraer el aire hasta obtener las condiciones de vacío.

Posteriormente se permite el paso del fluido caloportador hacia los serpentines hasta conseguir la evaporación del agua contenida en el grano y llegar a las características indicadas.

El trabajo en vacío tiene la ventaja de reducir considerablemente las pérdidas por convección con el medio controlado, beneficiando la transferencia de calor por conducción. Además la temperatura de evaporación del agua contenida en el grano disminuye por la reducción de presión dentro del recipiente, requiriéndose menos energía para obtener el resultado deseado.

Una vez conseguidas las condiciones finales del arroz, se procede a extraer el vapor saturado que salió del grano y que se encuentra en el recipiente mediante la bomba de vacío, luego se abrirá la válvula de paso (7) para permitir el ingreso de aire al recipiente hasta igualar a la presión atmosférica del medio (esto permite abrir la compuerta), y se abre la purga para eliminar el condensado contenido en el recipiente. Finalmente se abre el recipiente para descargar el arroz e iniciar nuevamente el ciclo.

Descripción de accesorios

El termómetro (3) es utilizado para controlar el parámetro de temperatura a la salida de la unidad de calentamiento

La válvula de paso (4) está ubicada a la salida de la unidad de calentamiento para controlar el caudal de agua.

El vacuómetro (6) sirve para controlar el parámetro de presión de vacío en el interior del recipiente

La válvula de paso (7) sirve para permitir el ingreso de aire una vez terminado el proceso para facilitar la apertura del recipiente.

La válvula de paso (8), sirve para mantener el vacío una vez que se apaga la bomba impidiendo el retorno del aire.

2.3.6 COMPORTAMIENTO DE LAS MOLECULAS BAJO EFECTOS DEL VACIO

La **Figura 2.22** representa el comportamiento de las moléculas de agua dentro del grano, durante el proceso de secado con tecnología de vacío.

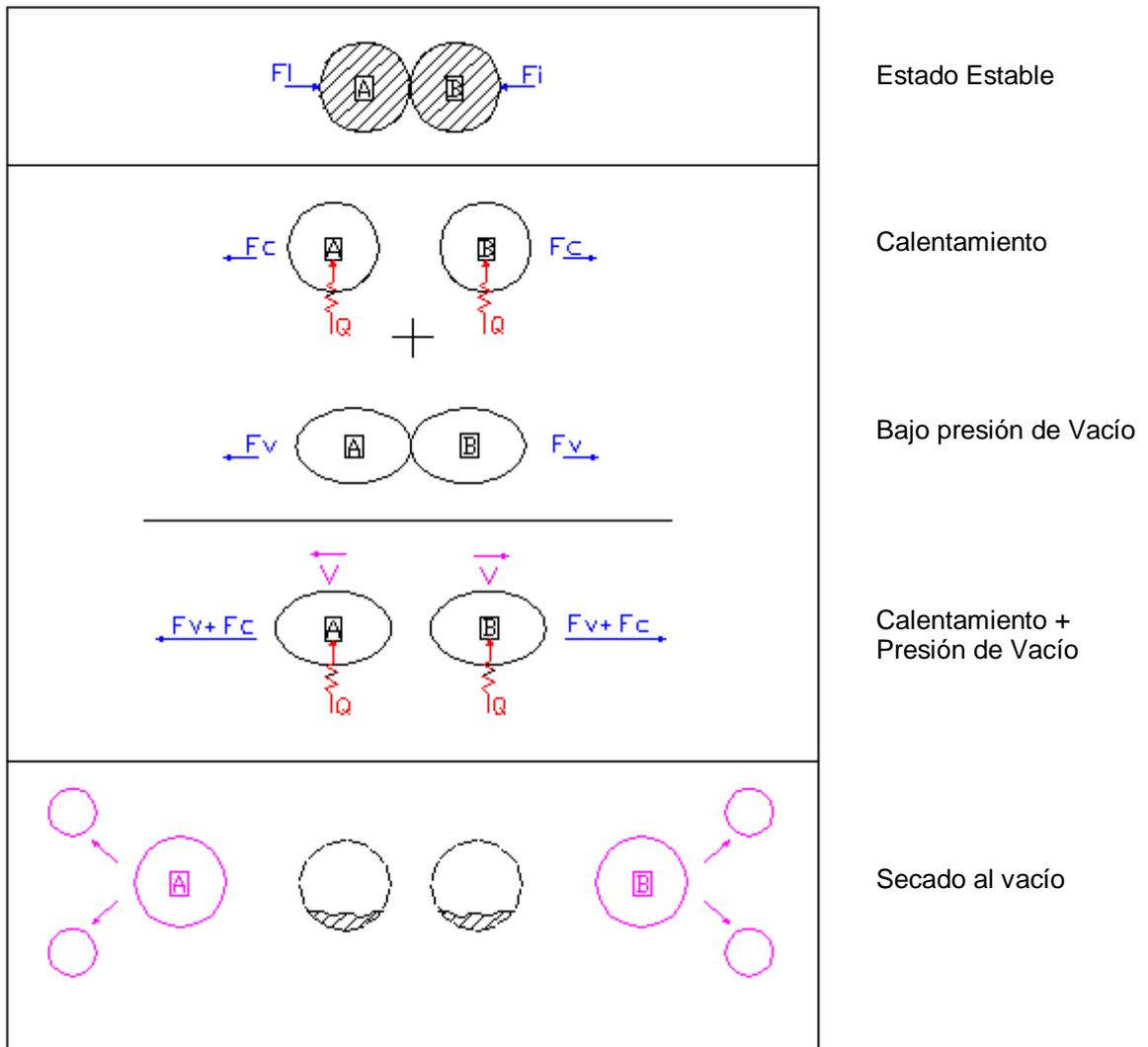


Figura 2.22 Esquema del Secado con tecnología de Vacío

Donde:

F_i = Fuerzas internas

F_c = Fuerzas debido al calentamiento

F_v = Fuerzas debido al vacío

Q = Calor añadido a las moléculas

V = Velocidad de separación de las moléculas

CAPITULO 3

3. DISEÑO TERMODINÁMICO DEL SISTEMA DE SECADO

3.1 DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DEL PROCESO DE SECADO.

Los parámetros que influyen en la tasa de secado son: la temperatura y la humedad relativa ambiente, el contenido de humedad inicial y de equilibrio de los granos y, dado el caso, la velocidad de dichos granos dentro del secador. El tipo de grano y las condiciones en la fase de campo también pueden influir en su tasa de secado.

Los parámetros de secado citados no son independientes. Esto quiere decir que influyen en la tasa de secado como un conjunto de factores y no aisladamente. El manejo adecuado de dichos parámetros permite determinar el equipamiento apropiado para las condiciones específicas de secado.

Temperatura de secado y estancia del producto en el sistema

La influencia de cada parámetro en el secado no se podrá establecer de manera aislada, pues el cambio de uno de ellos altera el comportamiento de los demás durante el proceso de secado. Esa interdependencia entre los parámetros hace que el dimensionamiento y la optimización de los secadores de granos se realicen con cautela. Por otra parte, el conocimiento de dicha interdependencia permite desarrollar nuevas tecnologías de secado. Con fines ilustrativos se hacen a continuación algunos comentarios acerca de la influencia recíproca entre la temperatura de secado y la estancia del producto en el secador.

Es universalmente aceptado que la temperatura de secado para semillas no debe subir de 40°C. Esta afirmación, por si sola, es incompleta, pues el tiempo de exposición del producto al sistema de secado es un elemento que hay que considerar. En vista de eso, se sugiere usar el término tiempo de residencia del producto en el secador, para definir mejor las condiciones de secado. El tiempo de residencia puede aparecer expresamente como valor definido, o bien implícitamente, mencionando el diseño y tipo de operación de la cámara de secado.

Mecanismo de transferencia de calor

Los mecanismos de transferencia de calor más apropiados son la conducción y la radiación para el trabajo en vacío, ya que las pérdidas por convección son despreciables debido a que no existe flujo de aire por el tipo de sistema en el que se trabaja, lo que beneficia los procesos de transferencia inicialmente nombrados.

Se ha escogido el mecanismo de transferencia de calor por conducción por las facilidades constructivas y bajo costo frente al uso de sistemas de radiación que implica elevados costos y alta disponibilidad de tecnología.

3.1.1 RANGO DE PRESIÓN DE VACÍO IDEAL DE OPERACIÓN

La presión de operación esta relacionada directamente con la temperatura de secado, en el caso de trabajo al vacío al disminuir la presión, baja considerablemente la temperatura de evaporación del agua contenida en el grano, lo que significa un menor consumo de energía, por ende ahorro de combustible generando una ventaja económica, además que por este método se tiene una menor diferencia de temperatura lo que implica una mejor eficiencia del sistema.

La composición del aire en el interior del recipiente no influye en el proceso de secado, debido a que lo que se busca es reducir la presión para generar un ambiente controlado del proceso, por lo que se ha escogido el rango de bajo y mediano vacío, con las respectivas ventajas que esto implica, como se ha indicado anteriormente en el capítulo de sistema adecuado de trabajo.

El rango de presión para bajo y mediano vacío se manifiesta desde un poco menos de 760 torr hasta 10^{-2} torr. En nuestro caso se ha escogido una presión de 76 torr debido que la temperatura de evaporación del agua correspondiente a esta presión es de 45 °C, valor que se encuentra dentro del rango permitido para el secado de granos, sin afectar sus propiedades internas.

3.3.2 RANGO DE TEMPERATURA ADECUADA DE TRABAJO

La temperatura de secado, determina la cantidad de agua evaporada en un secador. La temperatura del ambiente controlado de secado es el parámetro de mayor flexibilidad en un sistema de secado al vacío e influye significativamente

en la tasa y la eficiencia de secado y en la calidad del producto final, las temperaturas de secado elevadas pueden causar daños térmicos en los granos.

Para nuestro sistema se ha considerado una transferencia de calor por conducción a través de una placa que en contacto con el grano tendrá una temperatura de 46 °C necesaria para vaporizar el agua en el grano según las condiciones de presión descrita anteriormente.

3.1.3 OTROS FACTORES

Humedad inicial del producto

El contenido de humedad inicial también influye en la tasa de secado. Cuanto más elevado sea el contenido de humedad de un producto, mayor será la cantidad de agua evaporada por unidad de energía. Con elevados contenidos de humedad, las fuerzas de adsorción de la estructura celular del material sobre las moléculas de agua, son menores que cuando el contenido de humedad del producto es más bajo. En consecuencia, se utiliza un mayor porcentaje de energía disponible para evaporar la humedad contenida en los granos más secos.

Para el caso en estudio la humedad inicial del producto es del 20% según datos proporcionados por el INIAP.

Humedad final del producto

La humedad final es el parámetro más importante en el almacenamiento de granos, ya que una excesiva tasa de secado produce decoloración o estrés mecánico, lo que conlleva a pérdidas definitivas de las propiedades del producto.

En el caso contrario, el almacenamiento con una elevada humedad ocasiona un deterioro en la calidad del grano debido a que se favorece al crecimiento de agentes biológicos tales como hongos. Por tanto según datos emitidos por el INIAP para el manejo poscosecha del arroz se recomienda una humedad final del 12% en base seca del producto, para el óptimo almacenamiento.

Entalpía de Vaporización

La entalpía de vaporización se define como la energía necesaria para que una unidad de masa de una sustancia pase del estado líquido al estado gaseoso. Si se trata de productos biológicos, tales como los granos, se define como la cantidad de energía necesaria para evaporar una unidad de masa de agua contenida en el producto.

Masa de producto

Es uno de los factores más importantes para el dimensionamiento del sistema ya que la energía requerida es directamente proporcional a este factor, mientras mayor sea la cantidad de masa en el proceso se necesitará una mayor cantidad de energía y viceversa.

Características físicas del grano

Para nuestro sistema se ha tomado como referencia los datos obtenidos de la variedad INIAP - 14 Filipino ya que en la ficha técnica de éste, encontramos todas sus características técnicas y físicas que servirán para el dimensionamiento del prototipo a construirse.

- Longitud del grano 7,1 mm
- Ancho de grano 2,19 mm
- Peso de 1000 granos 26 g

3.4 COMPARACIÓN DE LOS MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

a) Conducción

La conducción es la transferencia de calor a través de un material fijo, en donde la dirección del flujo de calor se da en ángulos rectos a la pared si las superficies de las paredes son isotérmicas y el cuerpo es homogéneo e isotrópico, por tanto este mecanismo es beneficioso cuando se tiene un flujo de calor por contacto a través de superficies fijas con materiales de buena conductividad térmica y en ambientes controlados como el vacío en donde no se tiene pérdidas por contacto con un fluido externo al sistema.

b) Radiación

La radiación involucra la transferencia de energía radiante desde una fuente a un receptor. Cuando la radiación se emite desde una fuente a un receptor, parte de la energía se absorbe y parte es reflejada por él.

Basándose en la segunda ley de la termodinámica, Boltzmann estableció que la velocidad a la cual una fuente da calor es:

$$dQ = \sigma \cdot \varepsilon \cdot dA \cdot T^4$$

(3.1)

Donde:

$$\sigma = 0,173 \times 10^{-8} \left(\frac{Btu}{h \cdot ft^2 \cdot R^4} \right) \text{ Constante de Stefan Boltzmann}$$

ε = Emisividad del material

dA = Diferencial de área de la fuente

T = Temperatura absoluta de la fuente (R)

Analizando estos parámetros se observa que se necesita altas temperaturas de la fuente de calor para que la transferencia sea considerable. Lo implica alto consumo de energía por parte del emisor, incrementando considerablemente los costos, si se utiliza este tipo de sistema.

c) Convección

La convección es la transferencia de calor entre partes relativamente calientes y frías de un fluido por medio de mezcla. La transferencia de calor se debe al movimiento del fluido. El fluido frío adyacente a superficies calientes recibe calor que luego transfiere al resto del fluido frío mezclándose con él.

La convección libre o natural ocurre cuando el movimiento del fluido no se complementa por agitación mecánica. Pero cuando el fluido se agita mecánicamente, el calor se transfiere por convección forzada.

En el caso de un sistema al vacío la convección se considera despreciable debido a la poca cantidad de fluido existente, por lo que si se desear aprovechar este tipo de transferencia es recomendable la utilización de tubería en cuyo interior recorra un fluido a un determinado caudal y temperatura de manera que la tubería al alcanzar una determinada temperatura transfiera calor al producto contenido en el interior el recipiente mediante los dos mecanismos mencionados anteriormente.

3.5 DISEÑO DEL SISTEMA DE TRANSFERENCIA DE CALOR ADECUADO A LOS REQUERIMIENTOS

Se ha escogido un sistema de transferencia de calor por conducción, debido a que es el más adecuado para trabajar en vacío desde el punto de vista técnico y económico con las correspondientes ventajas enunciadas anteriormente.

3.3.1 DATOS INICIALES DE DISEÑO

De acuerdo a los requerimientos y los parámetros del proceso analizados previamente se tienen los siguientes datos de entrada para el desarrollo del diseño que satisfaga las condiciones finales que se desea obtener.

Condiciones Iniciales

$m_{\text{arroz}} := 5$ (kg)	Masa inicial de arroz
$H_{bhi} := 0.2$	Contenido inicial de humedad en el grano
$T := 27$ (°C)	Temperatura del bulbo seco
$\phi := 70$ %	Humedad relativa

Condiciones Finales

$H_{bhf} := 0.12$	Contenido de humedad del grano en equilibrio higroscópico
$H_e := H_{bhf}$	

3.5.2 CALCULO DE LA ENERGÍA NECESARIA PARA VAPORIZACIÓN

$P := 0.1$ (at)	Presión de Vacío en el interior del recipiente
$P := 9.806$ (kPa)	

Este valor de presión se utilizará para determinar la entalpía de vaporización del agua libre, en base a interpolación, para la posterior determinación de entalpía del agua en el grano.

Tabla 3.1 Propiedades Termodinámicas del Agua

Presión		Entalpía de vaporización		Temperatura de saturación	
P1(kPa)	7,5	L1(kJ/kg)	2406	T1(°C)	40,29
P2(kPa)	10	L2(kJ/kg)	2392,8	T2(°C)	45,81

Fuente: CENGEL Yunus, Termodinámica, Segunda Edición

$$L'v := \frac{L2 - L1}{P2 - P1}(P - P1) + L1 \quad (3.2)$$

$$L'v = 2393.824 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) \quad \text{Entalpía de vaporización del agua libre @ } P = 9.806 \text{ kPa (0.1 de la presión atmosférica)}$$

$$T := \frac{T2 - T1}{P2 - P1}(P - P1) + T1 \quad (3.3)$$

$$T = 45.382 \quad (°C) \quad \text{Temperatura de vaporización del agua a } P = 0.1 \text{ at}$$

Determinación de la entalpía de vaporización del agua del grano

Constantes del arroz para la ecuación 2.11

$$a := 2.1274$$

Datos obtenidos de la tabla 2.9

$$b := 21.61$$

$$Lv := L'v \cdot (a \cdot e^{-b \cdot He} + 1)$$

$$Lv = 2774.652 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) \quad \text{Entalpía de vaporización del agua del grano por unidad de masa del producto}$$

$$\Delta h_{fg} := Lv$$

Cálculo del flujo de calor por unidad de tiempo

$$\theta := 7200 \quad (\text{seg}) \quad \text{Tiempo de secado de los granos} = 2 \text{ horas}$$

$$Q := m_{\text{arroz}} \Delta h_{fg}$$

Calor requerido para evaporación del agua del grano (por la masa total del producto $m_{\text{arroz}} = 5 \text{ kg}$)

$$Q = 13873.26 \quad (\text{kJ})$$

$$q := \frac{Q}{\theta} \cdot 1000$$

$$q = 1926.84 \quad (\text{W})$$

Flujo de calor por unidad de tiempo para la evaporación del agua en el grano para condiciones finales de humedad 12%

3.3.3 CALCULO DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Propiedades Termo físicas de los materiales

Placa de Aluminio

$k_{Al} := 237 \quad \left(\frac{W}{K \cdot m} \right)$ Conductividad Térmica del Aluminio

$t_{Al} := 1.20 \quad (mm)$ Espesor de la lámina de Aluminio

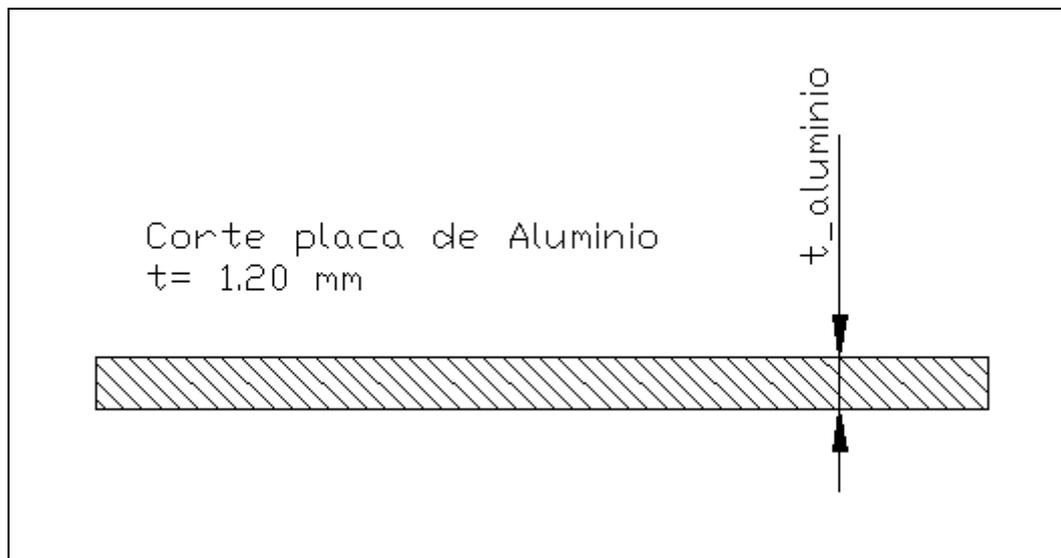


Figura 3.1 Espesor de la placa de acero a utilizarse

Tubo de Cobre

$k_{cu} := 387.52 \left(\frac{W}{K \cdot m} \right)$ Conductividad Térmica del Cobre
Fuente: KERN, Donald; Procesos de transferencia de calor

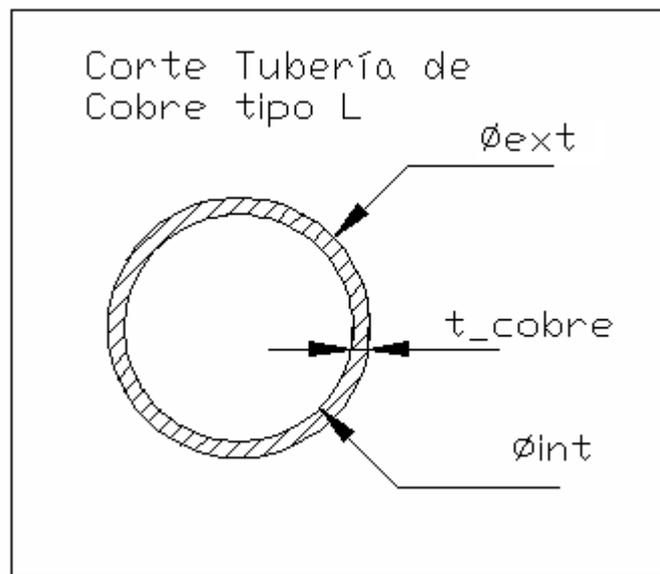


Figura 3.2 Corte de tubería de cobre Tipo L

Esquema del sistema placa-tubo

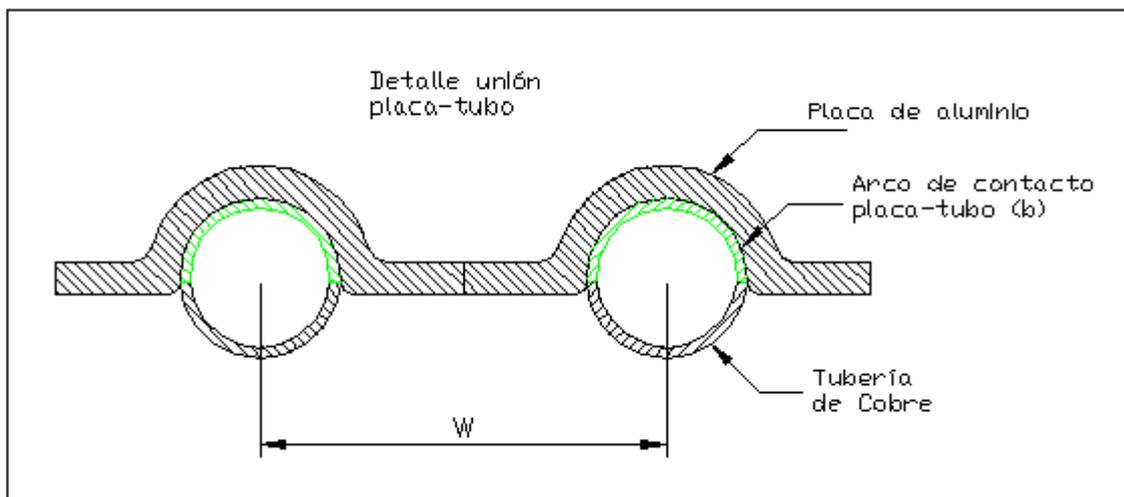


Figura 3.3 Esquema unión placa tubo

Características dimensionales de la tubería de cobre Tipo L

(Referencia: ISO 274-1975 Cooper tubes of circular section dimension)

Tubo de cobre Diámetro estándar 12.5 mm (1/2")

$$\phi_{\text{ext}} := 15.88 \quad (\text{mm})$$

$$r_{\text{ext}} := \frac{\phi_{\text{ext}}}{2}$$

$$r_{\text{ext}} = 7.94 \quad (\text{mm})$$

$$t_{\text{cobre}} := 1.02 \quad (\text{mm}) \quad \text{Espesor para tubería de cobre tipo L}$$

$$\phi_{\text{int}} := \phi_{\text{ext}} - 2 \cdot t_{\text{cobre}} \quad (\text{mm})$$

$$\phi_{\text{int}} = 13.84$$

$$r_{\text{int}} := \frac{\phi_{\text{int}}}{2}$$

$$r_{\text{int}} = 6.92 \quad (\text{mm})$$

$$P := \phi_{\text{ext}} \cdot \pi$$

$$P = 49.888 \quad \text{Perímetro exterior del tubo}$$

$$A_{\text{anillo}} := \pi (r_{\text{ext}}^2 - r_{\text{int}}^2)$$

$$A_{\text{anillo}} = 47.618 \quad (\text{mm}^2)$$

Cálculo de h por convección interna del tubo

$$A_{\text{int}} := \pi \cdot r_{\text{int}}^2$$
$$A_{\text{agua}} := 55 + 273.15$$

$$A_{\text{agua}} = 15329.15 \quad (\text{mm}^2) \quad \text{Área interior de la sección}$$

Tabla 3.2 Propiedades Termofísicas del Agua

Temperatura		Número de Prandtl		Coeficiente de Conductividad Térmica	
T1(K)	323	Pr1	3.54	k1(W/m·K)	64.8 x10 ⁻²
T2(K)	333	Pr2	3.98	k2(W/m·K)	65.9 x10 ⁻²

Fuente: KERN Donald; Procesos de transferencia de Calor

$$Pr := \frac{Pr2 - Pr1}{T2 - T1} (T_{\text{agua}} - T1) + Pr1 \quad (3.4)$$

$$Pr = 3.76 \quad \text{Número de Prandtl} \quad (3.5)$$

$$k_{\text{agua}} := \frac{k2 - k1}{T2 - T1} (T_{\text{agua}} - T1) + k1$$

$$k_{\text{agua}} = 0.654 \quad \text{Conductividad térmica del agua}$$

$$q_{\text{agua}} := 2 \left(\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right) \quad (3.6)$$

$$v := \frac{\frac{q_{\text{agua}}}{3600}}{\frac{A_{\text{int}}}{1000^2}}$$

$$v := 5.05 \cdot 10^{-7} \left(\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right) \quad \text{Viscosidad cinemática del agua @ 55 °C}$$

$$v = 3.693 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right) \quad \text{Velocidad media del fluido}$$

$$Re := \frac{v \cdot \frac{\phi_{\text{int}}}{1000}}{v} \quad (3.7)$$

$$Re = 101206.905 \quad \text{Número de Reynolds} \quad Re > 10000 \rightarrow \text{Flujo Turbulento}$$

$$f := (0.790 \cdot \ln(Re) - 1.64)^{-2} \quad (\text{Factor de Fricción de Darcy})$$

$$Nu := \frac{0.018 \left(\frac{f}{8} \right) (Re - 1000) Pr}{1 + 12.7 \left(\frac{f}{8} \right) \cdot \left(\frac{Pr}{3} \right)^{1/4} \cdot \left(\frac{Pr}{21} \right)^{-1/4}}$$

$$h_{\text{agua}} := \frac{Nu \cdot k_{\text{agua}}}{D} \quad \text{LXXXIX}$$

Número de Nusselt según el coeficiente de convección del agua

(3.8)

(3.9)

Arco de contacto del tubo con la placa

$$b := \frac{P}{2 \cdot 1000}$$

$$b = 0.025 \quad (\text{m})$$

Analogía de Resistencias Térmicas por unidad de longitud

Se procede a calcular las resistencias térmicas por unidad de longitud, debido a que lo requerido es determinar la longitud necesaria de tubo que satisfaga las condiciones de diseño térmico del sistema.

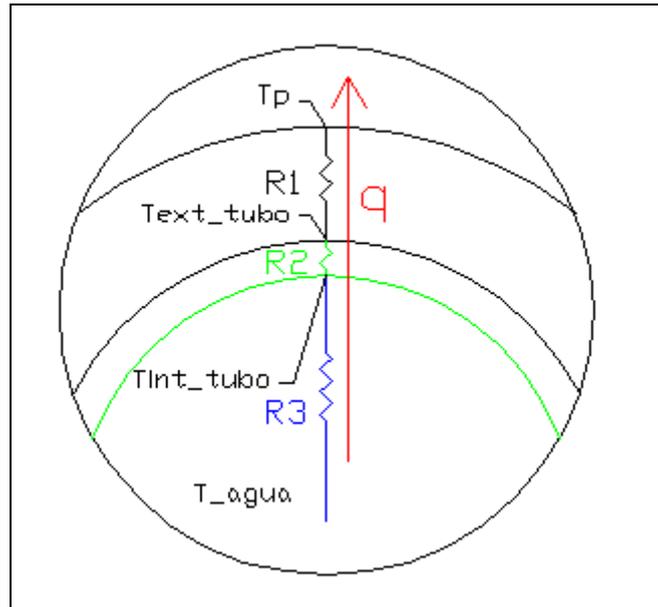


Figura 3.4 Analogía de resistencias para la transferencia de calor

Fórmulas de resistencia de Conducción y Convección

$$R_{cond} = \frac{L}{k \cdot A} \quad \text{Resistencia por Conducción para placa plana} \quad \left(\frac{K}{W} \right) \quad (3.10)$$

Donde:

L = Espesor de la placa plana (m)

K = Coeficiente de conductividad térmica $\left(\frac{W}{m \cdot K} \right)$

A = Área de contacto (m^2)

$$R_{cond_tubo} = \frac{1}{2\pi \cdot k \cdot L} \cdot \ln\left(\frac{r_{ext}}{r_{int}}\right) \quad \text{Resistencia por Conducción para tubo} \quad \left(\frac{K}{W} \right) \quad (3.11)$$

Donde:

L = Longitud del tubo (m)

K = Coeficiente de conductividad térmica $\left(\frac{W}{m \cdot K} \right)$

r_{ext} = Radio exterior del tubo (m)

r_{int} = Radio interior del tubo (m)

$$R_{conv} = \frac{1}{h \cdot A} \quad \text{Resistencia por Convección} \quad \left(\frac{K}{W} \right) \quad (3.12)$$

Donde:

$$h = \text{Coeficiente de Convección} \quad \left(\frac{W}{m^2 \cdot K} \right)$$

$$A = \text{Área de contacto} \quad (m^2)$$

Resistencia de Lámina de Aluminio

$$R1 := \frac{\frac{t_{Al}}{1000}}{k_{Al} \cdot b}$$

$$R1 = 2.03 \times 10^{-4} \quad \left(\frac{K \cdot m}{W} \right)$$

Resistencia de la Tubería de Cobre

$$R2 := \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot k_{cu}} \cdot \ln \left(\frac{r_{ext}}{r_{int}} \right)$$

$$R2 = 5.647 \times 10^{-5} \quad \left(\frac{K \cdot m}{W} \right)$$

Resistencia del Flujo de Agua de Convección

$$R3 := \frac{1}{h_{agua} \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{r_{int}}{1000}}$$

$$R3 = 1.068 \times 10^{-3} \quad \left(\frac{K \cdot m}{W} \right)$$

XCII

$$\text{Resistencia Total} \\ RT := R1 + R2 + R3 \quad \left(\frac{K \cdot m}{W} \right)$$

(3.13)

3.4 CÁLCULO DE PARÁMETROS DIMENSIONALES.

3.4.2 DETERMINACIÓN DE LA LONGITUD DE TUBO PARA LA TRANSFERENCIA DE CALOR

Sabiendo que el flujo de calor es directamente proporcional a la diferencia de potencial e inversamente proporcional a la resistencia que se aplica al sistema como se puede observar en la siguiente expresión:

$$\text{Flujo} \propto \frac{\text{Potencial}}{\text{Resistencia}}$$

(3.14)

En donde el potencial esta dado por la diferencia de temperaturas ($T_{\text{agua}} - T_{\text{placa}}$), y habiendo determinado el flujo de calor (q) y la resistencia total por unidad de longitud (RT), procedemos a calcular la longitud de tubería necesaria para las condiciones de temperatura requerida en la placa que evapore el agua del grano hasta obtener las características finales deseadas (12% de humedad).

De la expresión 3.14 se obtiene la ecuación de flujo de calor que relaciona los parámetros anteriormente mencionados de la siguiente forma:

$$q = \frac{\Delta T}{RT} = \frac{T_{\text{agua}} - T_p}{RT}$$

(3.15)

La resistencia total RT se encuentra expresada por unidad de longitud por lo que se divide para esta dimensión, llegando a la siguiente relación:

$$q = \frac{T_{\text{agua}} - T_p}{\frac{RT}{L}} \quad (3.16)$$

La longitud (L) será función de la temperatura en la placa y de la ecuación 3.16 se obtiene la relación:

$$L(T_p) := q \cdot \frac{RT}{T_{\text{agua}} - (T_p + 273)}$$

Tabla 3.3 Longitud requerida en función de la temperatura de la placa

T_p (C)	T_p (K)	L (m)
30	303.150	0.102
31	304.150	0.107
32	305.150	0.111
33	306.150	0.116
34	307.150	0.122
35	308.150	0.128
36	309.150	0.135
37	310.150	0.142
38	311.150	0.150
39	312.150	0.160
40	313.150	0.170
41	314.150	0.183
42	315.150	0.197
43	316.150	0.213
44	317.150	0.232
45	318.150	0.256
46	319.150	0.284
47	320.150	0.320
48	321.150	0.365
49	322.150	0.426
50	323.150	0.511

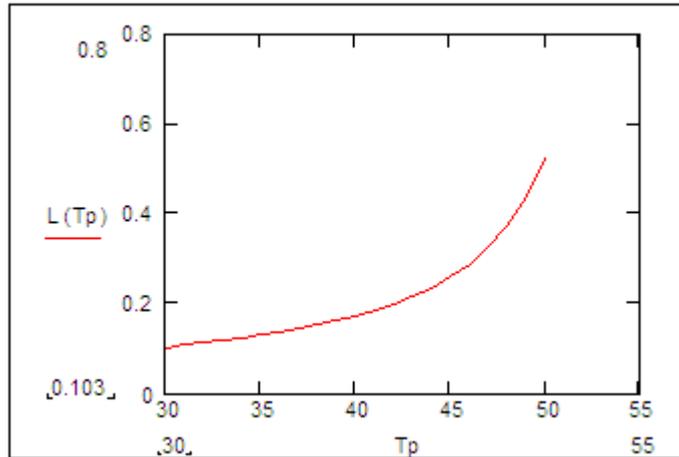


Figura 3.5 Gráfico $L = f(T_p)$

Con la consideración anterior y habiendo calculado la temperatura de saturación en la condición de presión de vacío cuyo valor es $45.38\text{ }^{\circ}\text{C}$, se toma este valor como temperatura de la placa (T_p) y se obtiene la longitud de acuerdo a esta condición, determinándose una longitud de 0.3 (m) .

La disposición de la tubería representada en la **Figura 3.3** indica el tipo de arreglo de diseño con una separación w , para los cual se debe tener en cuenta lo siguiente:

- La longitud inicial determinada no representa la longitud requerida debido a que la separación w genera un gradiente de temperaturas a lo largo de la placa, que se incrementa conforme aumenta la distancia w , reduciendo la eficiencia del sistema placa – tubo para las condiciones requeridas, razón por la cual se debe calcular la eficiencia del sistema adoptado y de esta forma sacar la longitud real.

Cálculo de la eficiencia del arreglo adoptado

Haciendo un símil al factor de eficiencia de aleta en colectores solares planos se obtiene el rendimiento del sistema propuesto, así:

$L_{\text{inicial}} := 0.3\text{ (m)}$ (Longitud requerida para obtener temperatura en la placa $T_p = 46\text{ }^{\circ}\text{C}$)

$$UI := \frac{1}{RT \cdot L_{\text{inicial}}} \tag{3.17}$$

$UI = 2511.413 \left(\frac{W}{m^2 \cdot K} \right)$ Coeficiente global de transferencia de calor del sistema

$w := 0.12\text{ (m)}$ Distancia entre tubos

$$m := \left(\frac{UI}{k_{Al} \cdot \frac{t_{Al}}{1000}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.18)$$

$$m = 93.971 \quad (m^{-1})$$

$$F := \frac{\tanh \left[m \cdot \frac{\left(w - \frac{\phi_{ext}}{1000} \right)}{2} \right]}{\left[m \cdot \frac{\left(w - \frac{\phi_{ext}}{1000} \right)}{2} \right]} \quad (3.19)$$

Longitud real:

$$L_{requerida} := \frac{L_{inicial}}{F} \quad \text{Factor de eficiencia del sistema placa - tubo} \quad (3.20)$$

$$L_{requerida} = 1.468 \quad (m)$$

Longitud comercial requerida = 1.50 (m)

3.4.3 DIMENSIONES DE LAS BANDEJAS

En función de la longitud requerida y la distancia entre tubos procedemos a realizar el dimensionamiento de las bandejas que satisfagan las condiciones de diseño de la manera más óptima.

Para determinar la altura de las paredes de las planchas se requiere calcular la altura que ocuparán los cinco kilogramos de arroz tomando en cuenta los siguientes parámetros:

Cálculo del área que ocupa el arroz

Datos dimensionales de un grano de arroz

$$\text{peso}_a := 26 \cdot 10^{-6} \quad (kg)$$

$$(m)$$

$$\begin{aligned} \text{ancho}_a &:= 2.19 \cdot 10^{-3} \\ \text{Area}_a &:= \text{largo}_a \cdot \text{ancho}_a \\ \text{largo}_a &:= 7.1 \cdot 10^{-3} \quad (\text{m}) \\ \text{Area}_a &= 1.6 \times 10^{-5} \quad (\text{m}^2) \quad \text{Área que ocupa un grano de arroz} \end{aligned}$$

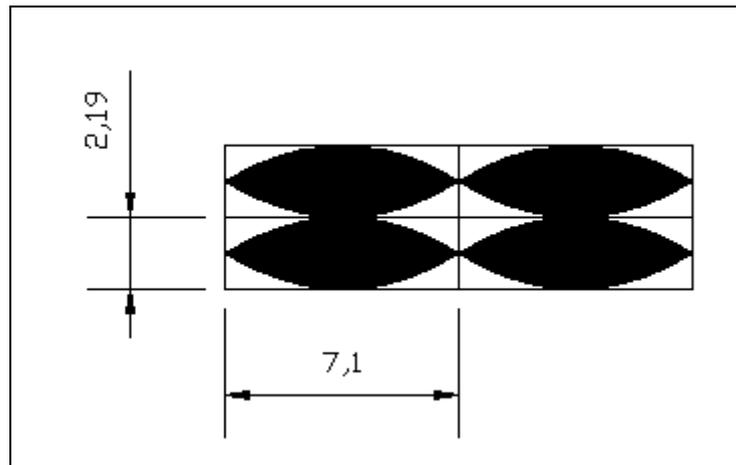


Figura 3.6 Esquema de la distribución de la capa de arroz

Para la determinación de la altura que ocupa el arroz se asumirá que el arroz se encuentra distribuido en capas como se indica en el esquema de la Figura 3.8, por lo que se procederá a calcular el número de capas que se colocaran en cada placa, de acuerdo al área total que ocupan los 5 kg de arroz.

Aplicando una proporcionalidad directa entre el área y el peso procedemos a obtener la superficie total de la cantidad de arroz indicada anteriormente, así:

$$\text{Area}_{5\text{kg}} : \text{peso}_{5\text{kg}} = \text{Area}_a : \text{peso}_a \quad (3.21)$$

$$\text{Area}_{5\text{kg}} := \frac{\text{Area}_a \cdot 5}{\text{peso}_a}$$

$$\text{Area}_{5\text{kg}} = 2.99 \quad (\text{m}^2)$$

Área total de los 5kg de arroz

Cálculo del área de las placas

La superficie de transferencia de las placas se establece en base a la distribución del tubo de acuerdo al parámetro de longitud y distancia entre los mismos, por tanto se considera un arreglo de 4 tubos divididos en pares y separados la longitud w especificada anteriormente, lo que da como resultado 2 bandejas con las siguientes dimensiones:

Se tiene la longitud requerida de 1.50 (m) divididos en arreglo de 4 tubos por tanto:

$$largo_p = \frac{1.50}{4} = 0.375(m)$$

Tomando el largo de la placa requerido:

$$largo_p = 0.38(m)$$

Para el cálculo del ancho de la placa se añadirá 0.04 (m) a cada lado de la distancia entre tubos que servirán para soporte de las mismas así:

$$ancho_p = 0.12 + 0.04 + 0.04 = 0.20(m)$$

Tomando el ancho de la placa requerido:

$$ancho_p = 0.20(m)$$

Por tanto la superficie de cada placa queda definida por:

$$Area_p := largo_p \cdot ancho_p$$

$$Area_p = 0.076 \quad (m^2)$$

Para la determinación de la altura de la placa se toma en cuenta las siguientes consideraciones:

1. El arroz se distribuye en forma de láminas
2. Cada lámina de arroz ocupa la superficie total de la placa
3. La superficie total del arroz se dispone en forma laminar a lo alto de la placa

En base a lo expuesto anteriormente se tiene:

$$N_laminas_a := \frac{Area_5kg}{Area_p} \tag{3.22}$$

$$N_laminas_a = 39.345 \quad \text{Número total de láminas de arroz}$$

$$N_{\text{laminas_placa}} := \frac{N_{\text{laminas_a}}}{2}$$

$$N_{\text{laminas_placa}} = 19.672 \quad \text{Número de láminas de arroz por placa}$$

Como el arroz se distribuye uniformemente en las bandejas, se multiplica el Número de láminas por placa por el ancho del arroz, para obtener la altura de la placa, así:

$$\text{Altura}_p := \text{ancho}_a N_{\text{laminas_placa}}$$

$$\text{Altura}_p = 0.043 \quad (\text{m})$$

Tomando la altura de la placa requerida:

$$\text{Altura}_p = 0.05 \quad (\text{m})$$

Tabla 3.4 Dimensiones finales de las bandejas

Dimensiones de las bandejas	
Largo (m)	0.380
Ancho (m)	0.200
Altura (m)	0.050

CAPITULO 4

4. DISEÑO DEL RECIPIENTE DE VACÍO

4.1 NORMAS DE DISEÑO

Para el diseño y construcción del recipiente se escogió las normas contenidas en el código ASME Sección VIII, División 1, ya que ahí se encuentran las reglas de diseño, construcción e inspección para recipientes sometidos a las condiciones requeridas.

4.1.1 INTRODUCCION AL CÓDIGO

4.1.1.1 Orígenes y políticas básicas:

La Asociación de Ingenieros Mecánicos de Estados Unidos (The American Society of Mechanical Engineers) fue fundada en 1880. Es una organización educativa, no lucrativa, que promueve el arte, la ciencia y la practica de la ingeniería mecánica en todo el mundo.

Su misión es promover y motivar la competitividad técnica y el bienestar profesional de sus miembros a través de programas de calidad y actividades en ingeniería mecánica y de esta manera contribuir para el bienestar de la humanidad.

Hoy ASME International abarca 125000 miembros alrededor del mundo, agrupados en 13 secciones regionales, siendo la última sección XIII la Internacional. En este grupo pertenecen los miembros de Europa, Asia, América Latina & Caribe y Australia.

4.1.1.2 Historia de los Códigos de construcción, referencia e inspección:

Antes que sea oficialmente aprobado y publicado el primer Código en marzo 1915, la sociedad ASME decidió estandarizar la tubería y las roscas, usadas en la distribución de vapor, formando los primeros comités, cubriendo de esta manera la necesidad de serios estudios sobre la fabricación de calderas y la generación de vapor, como fuente principal de energía.

El primer código fue concebido y perfeccionado como un documento técnico para comunicar los mínimos requerimientos de diseño, fabricación, instalación e inspección de calderas. Fue dividido en dos partes:

Parte I para nuevas instalaciones (80 páginas) y **Parte II** para instalaciones existentes (5 páginas).

El primer código contenía solo una fórmula de aplicación sobre la seguridad de los cilindros a presión interna.

$$P = \frac{t \cdot E \cdot S_T}{R \cdot F_S} \quad (4.1)$$

P - presión máxima de trabajo

t - espesor mínimo de la placa

E - eficiencia de la junta longitudinal

S_T - esfuerzo último en tensión del material usado

R - radio interno

F_S - factor de seguridad (factor de diseño)

La relación S_T / F_S ha sufrido variaciones en el transcurso de los años. Antes del año 1998 el factor de diseño F_S era igual a 4.

El avance tecnológico en la fabricación de los materiales, que permitió el mejoramiento de sus propiedades, la utilización de nuevos y mejores procesos de soldadura y los avances en el arte de examinación no destructiva, han permitido que el valor disminuye a $F_s = 3,5$ a partir del año 1998.

4.1.1.3 Organización de ASME Sec. VIII, Div. 1 - Recipientes a Presión:

Sub-Sección A - Requerimientos Generales

Parte UG, Requisitos Generales

Sub-Sección B - Requerimientos para Métodos de Fabricación

Parte UW - Recipientes Soldados

Parte UF - Recipientes Forjados

Parte UB - Recipientes Fabricados por "Brazing"

Sub-Sección C - Requerimientos de Materiales

Parte UCS - Aceros al Carbón y Bajamente Aleados

Parte UNF - Materiales No-Ferrosos

Parte UHA - Aceros Altamente Aleados

Parte UCI - Materiales de Hierro Fundido

Parte UCL - Recipientes de "Clad"

Parte UCD - Materiales de Fundición Dúctil

Parte UHT - Materiales Tratados Térmicamente

Parte ULW - Recipientes por "Capas"

Parte ULT - Materiales para Baja Temperatura

Tablas

Apéndices

Obligatorios

No – obligatorios

4.1.1.4 Definiciones Generales:

Estándar

Puede ser definido como el conjunto de definiciones técnicas e instrucciones de guía para el diseño y fabricación. Los estándares son escritos por expertos y su uso es voluntario. En 1991 ASTM (The American Society for Testing and Materials) define los estándares "...como el vehículo de comunicación entre el fabricante y el usuario; sirven de lenguaje común, definiendo

la calidad y estableciendo los criterios de seguridad; los costos son más bajos si los procedimientos son estandarizados..."

Código

El Código es el Estándar aprobado por una o más instituciones gubernamentales y tiene la fuerza de ley, lo que significa que su uso es obligatorio.

¿Quién elabora los Estándares?

Los Estándares son desarrollados por ASME y otras organizaciones, por grupos formados por ingenieros voluntarios, y los trabajos son presentados al público, para sus comentarios. ASME es la organización más antigua y respetada en la elaboración de estándares en el mundo. Por esto, muchos de ellos son aplicados internacionalmente. Según estudio, realizado por el Instituto Británico de Normas, el Código ASME para Calderas y Recipientes a Presión - BPVC - es aplicado en más de 70 países.

4.1.1.5 El proceso de revisión del Código:

Edición

Las ediciones del Código son editadas cada 3 años, la última edición es del 2004, pero por motivos de disponibilidad fue utilizada la edición 2001 para la elaboración del presente proyecto.

Adenda

Una revisión al código es un cambio en los requisitos anteriores.

Las revisiones, aprobadas por el Comité, son presentadas a ANSI (American National Standards Institute) y publicadas en Mechanical Engineering para comentarios de todos los interesados. Luego del tiempo para revisión pública y aprobación final del ASME, las revisiones son publicadas anualmente en la ADENDA del Código, en páginas de colores, y son obligatorias 6 meses después de la edición de la Adenda.

Las Adendas son editadas anualmente:

- El 1 de Julio del año siguiente a la edición del Código
- El 1 de Julio a los dos años de la edición del Código y enviadas automáticamente al cliente, previa confirmación y compra de las mismas.

Interpretaciones

Las interpretaciones son opiniones oficiales editadas por ASME, las cuales clarifican el intento del Código, basadas en las preguntas hechas. Son publicadas por separado e incluidas a la sección actualizada.

Casos Código

El Comité de Calderas y Recipientes a Presión se reúne regularmente para considerar las adiciones y revisiones propuestas al Código y para formular Casos que clarifiquen el intento de los requisitos existentes o suministren cuando la necesidad sea urgente, reglas para materiales o construcciones las cuales no están cubiertas por las reglas existentes del Código.

Aquellos casos que han sido adoptados aparecen en el libro de Casos Código.

Los Casos Código son alternativas o reglas nuevas para el Código y son aplicables únicamente al Código especificado. **Su uso no es obligatorio, pero si son usados, se tiene que aplicar todos los requisitos e identificar el uso del Caso Código en el Reporte de Datos.**

4.1.1.6 Prefacio:

Este Código contiene requerimientos obligatorios, prohibiciones específicas y guías no obligatorias para las actividades de construcción que incluyen diseño, fabricación, examinación, inspección, pruebas y certificación.

Los aspectos no mencionados específicamente se consideran no prohibidos.

Este Código no es un manual de diseño y se requiere aplicar juicio de ingeniería, basado en conocimientos técnicos, educación, experiencia profesional y experiencia en el uso y aplicación del Código.

- Este Código no califica diseñadores.
- El diseñador es responsable para el cumplimiento de las reglas de esta sección.
- El Código no prohíbe el uso de computador y programas computarizados, siempre y cuando el fabricante (su diseñador) se responsabiliza con el cumplimiento del código.

Tolerancias

Cuando las dimensiones u otros parámetros no están especificados con tolerancias, estos valores deben ser considerados como nominales. Deben ser aplicadas tolerancias permisibles y variaciones locales, determinados por el diseñador, basados en juicios de ingeniería y práctica con estándares.

Revisiones de materiales

Son originadas por ASTM -- American Society for Testing and Materials, y generalmente son adoptadas por ASME.

Las especificaciones de los materiales, aprobados para el uso en cada sección del Código están listados en la Sección II, parte A y B.

No todos los materiales, incluidos en las especificaciones, en la Sec. II, son aprobados para uso del Código. Este esta limitado en cada sección por separado y se debe comprobar el límite de temperatura indicado para su uso.

Materiales fabricados con requerimientos, diferentes a los listados es posible ser usados, con un certificado, aceptado por el Inspector Autorizado, que los requerimientos en la Sec. II parte A y B están hechos.

4.1.1.7 Alcance de ASME Sec. VIII y responsabilidades:

Alcance de la Sección VIII, División 1

Factor de diseño para los esfuerzos permisibles de los materiales = 3,5

El alcance de la Sección VIII, División 1 incluye:

U-1(c) (2)

- Recipientes a presión que contienen agua cuando:
 - Presión de diseño > a 300 psi (2070 kPa)
 - Temperatura de diseño > 210°F (99°C)

- Tanques de almacenamiento de agua caliente, calentada por vapor u otros medios indirectos cuando:
 - Calor transmitido > 200 000,00 BTU/ hr
 - Temperatura del agua > 210°F (99°C)
 - Capacidad del tanque (agua contenida) > 120 galones

- Recipientes con presión de operación interna o externa > 15 psi (103 kPa)
- Recipientes de diámetro interior > 6" (pulgadas)

U-1(d)

- Recipientes para presión hasta 3000,00 psi (20685 kPa)

Nota: Para recipientes a presión > 3000,00 psi se debe aplicar condiciones adicionales de diseño y fabricación.

U-1(e)

En relación con la geometría, el alcance de la Sección VIII, Dív.1 incluye:

- Para tubería exterior conectada al recipiente a presión
 - Hasta de la primera soldadura circunferencial para conexiones soldadas

- Hasta la primera junta roscada para conexiones roscadas
 - Hasta la cara de la primera brida para conexiones bridadas
 - Hasta el primer sello del ajuste de la instrumentación
- Hasta la soldadura de partes a no-presión, soldadas externa o internamente a la superficie del recipiente a presión.
 - Hasta la tapa de entradas de hombre y aperturas de inspección

U-1(g)

- Recipientes, con generación de vapor como evaporadores, intercambiadores, equipos a vapor para productos químicos y de petróleo.

El alcance de la Sección VIII, División 1 no incluye:

- Recipientes dentro del alcance de otras Secciones
- Intercambiadores de calor tubulares a fuego directo
- Recipientes a presión que son parte integral de dispositivos rotativos como bombas, compresores, generadores
- Sistemas de tubería, que su función primaria es transportar fluidos de una localidad a otra, excepto lo cubierto por U-1 (f).
- Componentes y accesorios de tubería como bridas, pernos, empaques, válvulas, juntas de expansión, fittings.
- Recipientes a presión para uso humano
- Todos los recipientes dentro del alcance con los parámetros que no excedan los valores limitantes.

U-2 Responsabilidades

- El fabricante
 - Es responsable a cumplir con todos los requerimientos del código, incluyendo los trabajos realizados por otros
 - A tener disponibles para el Inspector Autorizado los cálculos de diseño
 - Es responsable por los trabajos como formado, pruebas no destructivas, tratamientos térmicos, realizados por otros, que cumplen con todos los requerimientos aplicables por esta división.
 - Es responsable por los detalles de diseño y construcción no contenidos en esta Sección
- El Inspector Autorizado
 - Realizar todas la inspecciones establecidas por esta División

- Monitorear el sistema de control de calidad y las pruebas realizadas por el fabricante
- Realizar otras inspecciones a su juicio si lo cree necesario, para comprobar el cumplimiento de los requerimientos para el estampe
- Verificar que los cálculos aplicables son hechos y archivados a la firma de los data reportes; cualquier reclamo o pregunta del Inspector por los cálculos debe ser resuelto

4.1.2 MATERIALES

Generalidades

ASTM - The American Society for Testing and Materials, es encargada a desarrollar los estándares utilizados voluntariamente en la industria. Los estándares para materiales son publicados en varias secciones.

En el Código ASME para Calderas y Recipientes a Presión ASME BPVC⁵, los materiales son presentados en la Sección II, que contiene 4 partes:

- Parte A - Materiales ferrosos
- Parte B - Materiales no ferrosos
- Parte C - Materiales de soldadura
- Parte D - Tablas de propiedades

En ASME B31 - Códigos para tuberías, cada uno contiene secciones de materiales.

Como ASME BPVC, tanto ASME B31, adoptan las especificaciones de ASTM para sus requerimientos y son listados en sus ediciones respectivamente.

4.1.2.1 Selección de materiales para unidades de proceso

Los dos principales objetivos en la selección de materiales son:

- Proveer aleaciones apropiadas, para lograr las expectativas del diseño al respecto de la vida útil de la unidad, mediante adecuada protección contra la corrosión.
- Proveer estabilidad metalúrgica, para prevenir fallas prematuras por causas de las condiciones de operación.

La experiencia es primordial, para que los materiales se desempeñen bien o mal. Es importante enfatizar, que cualquier cambio en las condiciones originales de diseño, puede alterar el comportamiento específico de los materiales.

Los materiales seleccionados para la construcción de equipos, deben proveer una vida útil de servicio mínimo, por ejemplo:

⁵ BPVC: Boiler Pressure Vessel Code

- 20 años - reactores para alta presión
- 10 años - contenedores, intercambiadores, calentadores, bombas, compresores, y tuberías de materiales de fundición y aleaciones
- 5 años - tuberías de acero al carbono, set de tubos para intercambiadores, repuestos para equipos rotativos.

Hay muchos factores que contribuyen en la vida de servicio del equipo, algunos de ellos podemos controlar, al realizar diseños acertados. En muchos casos un sobre espesor de corrosión, puede prolongar la vida útil de servicio del equipo.

4.1.2.2 Requerimientos para las propiedades de los materiales

- Resistencia mecánica - los materiales, usados para contener los fluidos del proceso, deben tener suficiente resistencia para cumplir con las condiciones de diseño
- Resistencia a la corrosión - los materiales deben poseer suficiente resistencia a las diferentes tipos de corrosión o ataques de hidrógeno del medio en que se desarrolla el proceso.
- Tenacidad - deben ser suficientemente tenaces y resistentes a las fracturas
- Shock térmico - ser razonablemente resistentes a los bruscos cambios de las temperaturas del proceso
- Resistencia a la abrasión - en algunos procesos los materiales son seleccionados para proveer resistencia a la abrasión de los sólidos
- Oxidación - ser resistentes a la oxidación, si altas temperaturas son encontradas
- Fabricación - ser compatibles con todos los procedimientos de fabricación

4.1.2.3 Clasificación, designación y aplicación

Designación

- Los materiales, especificados por ASTM llevan el prefacio A
- Mientras que son usados por ASME llevan SA antes de su número de especificación

Clasificación y aplicación

Aceros al carbono

SA-36, SA-283, SA-285, SA-516, - láminas

SA-105, SA-181, - forjas

SA-53, SA-106, SA-178, - tubos

Estos son los materiales más comunes, usados en plantas de proceso y refinerías. Se definen como los aceros completamente desoxidados durante las prácticas de maduración. La

desoxidación esta acompañada con el uso de aditivos como silicio, manganeso o aluminio, para absorber los gases disueltos, por general oxígeno, durante la solidificación. Esto resulta un acero de mejor calidad, libre de burbujas e inclusiones. ASME no acepta aceros al carbono para temperaturas mayores 900°F .

Aceros de baja aleación

SA 204 (C-1/2 Mo) - (carbono + 0,5% de molibdeno)

SA-302 Gr. A (Mn - Mo) - (manganeso + molibdeno)

Son usados para procesos de mayores temperaturas que los aceros al carbono y mas frecuentemente para temperaturas intermedias. Son resistentes a los ataques del H₂ .

SA 387 Gr.12 (1Cr-1/2 Mo)

SA 387 Gr.11 (1 1/4 Cr-1/2 Mo)

Estas aleaciones son usadas para mayores temperaturas y resistencia al H₂ .

SA 387 Gr.22 (2 1/4 Cr-1 Mo)

SA 387 Gr.21 (3Cr-1 Mo)

Tiene mayor resistencia a altas temperaturas e hidrogeno.

SA 387 Gr.5 (5Cr-1/2Mo)

Son usados con mas frecuencia para protección contra ataques combinadas de azufre y temperaturas sobre 550°F. Su resistencia al hidrógeno es mayor que los (2 1/4 Cr-1 Mo) pero la resistencia al H₂S es mínima.

Aceros inoxidable

Aceros inoxidable ferríticos

12% cromo (**tipo 405 y 410S**), estos aceros ferríticos o martencíticos se usan primeramente como recubrimientos. Tienen excelente resistencia al azufre y a temperaturas intermedias.

13% cromo **SA-240 tipo 410** - estos aceros inoxidable se usan extensivamente para componentes estandarizados en todos los procesos, como por ejemplo válvulas, bombas; tubos para intercambiadores de calor, componentes de recipientes y otros.

Aceros inoxidable austeníticos

Tipo 304 - (SA 240 tipo 304) - este es el acero inoxidable mas barato, presentaciones en laminas o tubos; resistentes al hidrógeno y sus sulfatos y altas temperaturas.

Tipo 309 y 310 - usados en servicios de alta temperatura y para soportes de la tubería.

4.1.2.4 Agrupaciones de los materiales:

Números P

Para reducir el número de calificaciones, requeridas por el procedimiento de soldadura, a los metales base se les han asignado Números P y para los metales base ferrosos, que tienen requerimientos específicos de prueba de Impacto, Números de Grupo, dentro de los Números P. Estas asignaciones son basadas esencialmente en las comparables características del metal base, como son la composición química, soldabilidad, propiedades mecánicas.

Números S

Estos materiales, asignados con el Número S, son aceptables para el uso del Código ASME B31 para tuberías a presión, o Casos Código BPVC, pero no son incluidos dentro de las especificaciones de materiales de la Sección II del BPVC. Son agrupados con Números S en grupos, similares a los grupos de Números P.

Números F

Es agrupamiento de materiales con Números F de electrodos y varillas de soldar, son basadas esencialmente en sus características de uso, que fundamentalmente determina la habilidad de los soldadores para hacer soldaduras satisfactorias con un metal de aporte dado.

4.2 DETERMINACIÓN DE CARGAS DE DISEÑO.

Según UG – 22 existen varios tipos de cargas identificados en la Sección VIII, y todas deben ser consideradas en el diseño del recipiente. Estos son:

- Cargas por Presión
- Gradientes por Temperatura
- Peso del recipiente y su contenido
- Cargas Superpuestas
- Esfuerzos Localizados
- Cargas de Impacto
- Cargas de Viento*
- Cargas de Terremoto*

* Cuando sean aplicables utilizando el código estructural

En el caso en estudio la carga determinante para el diseño es únicamente la presión externa.

Nota: La Sección VIII, División 1 suministra reglas únicamente para calcular las cargas por presión. Para las otras condiciones, cualquier práctica de ingeniería puede ser usada

4.2.1 TEMPERATURA DE DISEÑO

UG -20

Contiene los requerimientos para las temperaturas máxima y mínima del metal, usadas en el diseño de recipientes y partes a presión. El código requiere que ambas temperaturas sean estampadas en la placa del recipiente.

4.2.1.1 Temperatura máxima de diseño

La temperatura máxima de diseño se aplica para determinar el esfuerzo máximo permisible del material (S) tomado de las tablas 1A y 1B de la parte D de la Sección II, usado en las fórmulas de cálculo.

La temperatura máxima de operación es igual o mayor a la temperatura promedio de la pared del metal durante la operación.

La temperatura máxima de diseño se determina, adicionando un margen sobre la temperatura máxima de operación. Este margen depende de la estabilidad del proceso y generalmente es entre 25°F y 50°F. Procesos inestables pueden tener un margen mayor. Margen de 0°F se usa solo para procesos muy estables y predecibles.

Para el caso del modelo estudiado se ha determinado una temperatura máxima de diseño igual a 115 °F (46 °C), considerando la temperatura máxima ambiental del entorno en el cual se encontrará el recipiente, a ésta se añade $\Delta T = 25$ °F (13.89 °C) según lo señalado en la norma. Teniendo la temperatura $T_{max} = 140$ °F (60°C)

4.2.1.2 Temperatura mínima de diseño

La Mínima Temperatura de Diseño del Metal (MDMT) según UG-20(b) es la más baja temperatura a la cual el recipiente estará expuesto durante el servicio.

Puede ser calculada o medida y puede ser diferente para las distintas zonas del recipiente.

Un margen razonable debe ser usado para la MDMT.

Es aplicada para la determinación de la necesidad de la prueba de impacto.

La temperatura mínima de diseño del metal (MDMT) es igual a 42 °F (5.5 °C) considerando la temperatura más baja a la cual el recipiente está expuesto, según datos obtenidos de las condiciones ambientales del sector donde se va a trabajar.

4.2.2 PRESIÓN DE DISEÑO

UG-21

Todos los recipientes a presión deben ser diseñados con la presión a las condiciones más severas expuestas de presión y temperatura durante la operación.

Para la MAWP - *Presión máxima admisible de trabajo se refiere a la presión que señala el manómetro sobre la presión atmosférica.*

Para obtener la presión de diseño, una buena práctica es proveer un margen de 10% sobre la MAWP, para probables variaciones de la presión durante el proceso:

Es responsabilidad del fabricante señalar la MAWP en la placa del estampe.

Es responsabilidad del diseñador (fabricante) usar los valores apropiados de la presión de diseño, diámetro o radios, en el uso de las formulas de esta sección.

La presión máxima dentro del recipiente es igual a 1/10 de la presión atmosférica, valor correspondiente a presión absoluta por lo que el recipiente se encuentra sometido externamente a presión manométrica resultado de la diferencia entre el valor de la presión absoluta y atmosférica.

$$P_{abs} := 1.47 \quad 1/10 \text{ de la atmosférica}$$

$$P_{atm} := 14.7 \quad (\text{Psi})$$

$$P_{mano} := P_{abs} - P_{atm} \quad (\text{Psi}) \quad (4.2)$$

$$P_{mano} = -13.23 \quad \text{Presión Manométrica}$$

$$P_{ope} := P_{manc} \quad \text{Presión de Operación}$$

$$P_{ope} = -13.23 \quad (\text{Psi}) \quad \text{Presión de operación del recipiente sometido a presión externa}$$

$$P_{ope} := 13.23 \quad (\text{Psi}) \quad \text{CXI}$$

4.3 CÁLCULO DE PARÁMETROS DIMENSIONALES

4.3.1 DETERMINACIÓN DEL DIÁMETRO INTERIOR Y LONGITUD DEL CUERPO DEL RECIPIENTE

En base a la distribución que tendrán las bandejas dentro del recipiente, como se observa en la **Figura 4.2**, se tiene los parámetros dimensionales de longitud y diámetro interior:
 $\phi_{int} = 0.3048 \text{ (m)}$

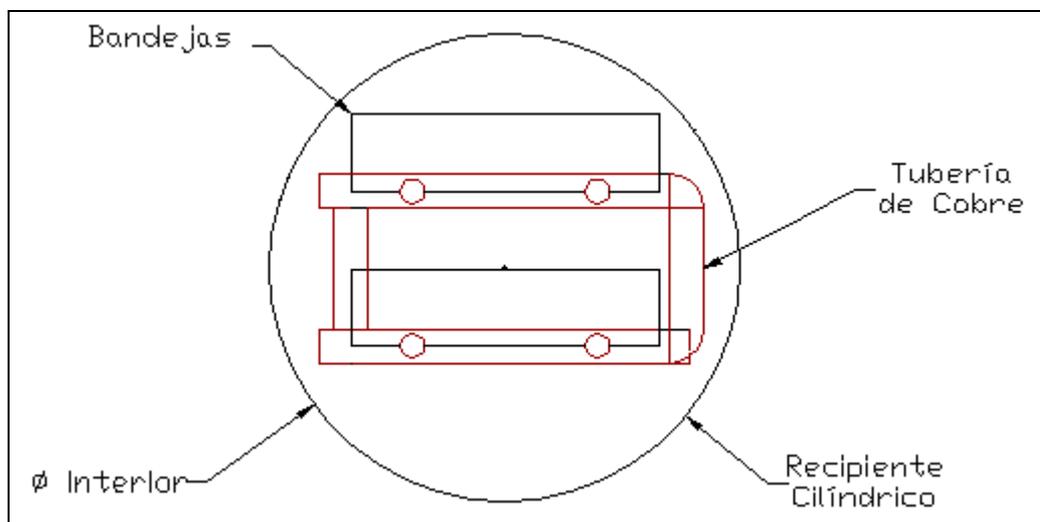


Figura 4.1 Esquema de distribución de bandejas y tubería

Para el cálculo de la longitud del cuerpo del recipiente se partió de la longitud de las bandejas igual a 0.38 m a la cual se añade el diámetro nominal exterior de la tubería de cobre de distribución principal de agua de $\frac{3}{4}$ ", agregando la distancia de dos veces el diámetro del tubo, ya que para cualquier abertura de boca debe existir esta distancia mínima desde el borde de la placa, como se ve en el esquema de la **Figura 4.2**.

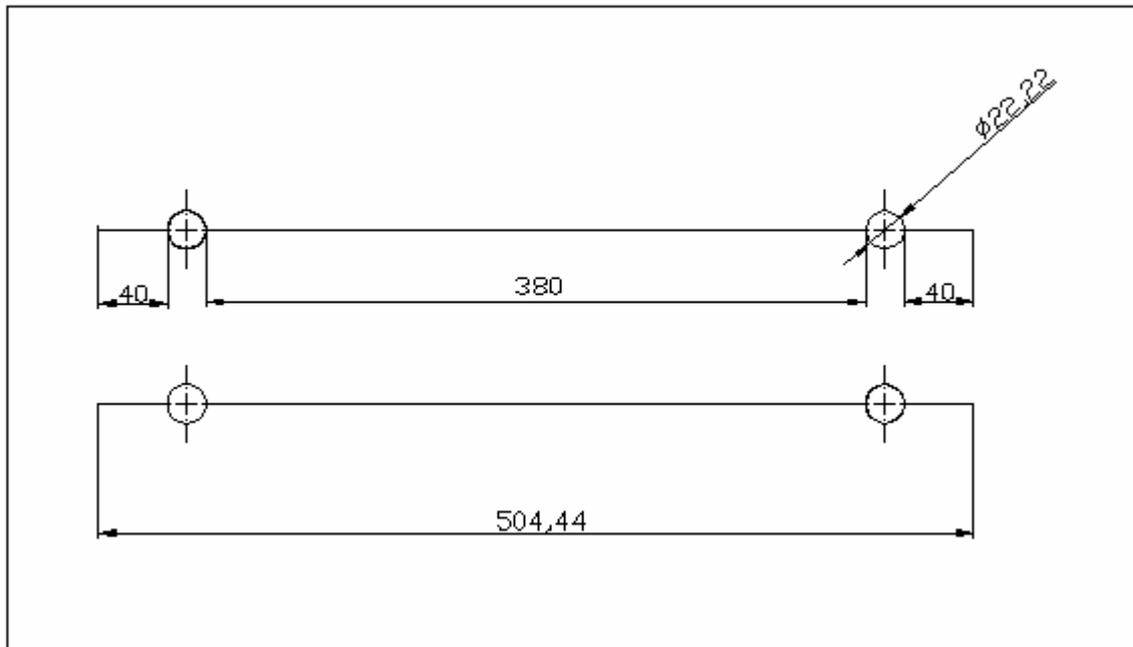


Figura 4.2 Esquema de distribución de bocas del recipiente (Vista Lateral)

En base al esquema de la **Figura 4.2** se determina la longitud del cuerpo del recipiente:

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

4.3.2 DETERMINACIÓN DEL ESPESOR DEL CUERPO Y CABEZAS.

Para determinar la presión de diseño del recipiente se añadirá 10% al valor de la presión de operación:

$$P_{\text{ope}} := 13.23 \text{ (Psi)}$$

$$P_{\text{dis}} := P_{\text{ope}} \cdot 1.10$$

$$P_{\text{dis}} = 14.55 \text{ (Psi)} \quad \text{Presión de diseño}$$

4.3.2.1 Espesor del Cuerpo

Para el diseño se utilizará la parte UG -28 de la Sección VIII, div.1 que es aplicable para recipientes sometidos a presión externa, para lo cual se seguirá el procedimiento detallado:

Paso 1. Asumir un valor de t . Se determina el valor de L/Do y Do/t .

$$t := \frac{2}{25.4}$$

$$t = 0.079 \text{ (plg)}$$

$$Do := \phi_{\text{int}} + 2t$$

CXIII

$$Do = 12.157 \text{ (plg)}$$

(4.3)

$$\frac{L}{Do} = 1.619$$

$$\frac{Do}{t} = 154.400$$

Paso 2. Ingrese a la figura G (ver Anexo J), con el valor de L/Do. Ingrese con 50 cuando L/Do es mayor que 50, y con 0.05 cuando L/Do es menor que 0.05.

Paso 3. Moverse horizontalmente a la curva que represente Do/t. Desde el punto de intersección moverse verticalmente para determinar el valor de A.

$$A := 0.0004$$

Paso 4. Ingrese a la tabla aplicable al material FIG. CS – 2 (ver Anexos), con el valor de A. Moverse verticalmente a la línea correspondiente de temperatura.

Paso 5. Desde el punto de intersección moverse horizontalmente y obtener el valor de B.

$$B := 5600$$

Paso 6. Calcular la máxima presión admisible de trabajo, Pa.

$$Pa := \frac{4 \cdot B}{3 \cdot \left(\frac{Do}{t} \right)} \quad (4.4)$$

$$Pa = 48.359 \text{ (psi)}$$

Si la máxima presión admisible de trabajo es menor que la presión de diseño, el procedimiento de diseño debe ser repetido incrementando el espesor del recipiente o disminuyendo la longitud del mismo mediante anillos de retención.

Debido a que la máxima presión admisible de trabajo calculada, $P_a > P_{dis}$, se procede a realizar iteraciones para encontrar el espesor óptimo de trabajo para la presión de diseño.

En base a lo anterior se procede a realizar iteraciones:

Segunda iteración:

$$t := \frac{1.4}{25.4} \quad (\text{plg})$$

$$t = 0.055$$

$$D_o := \phi_{int} + 2t$$

$$D_o = 12.11 \quad (\text{plg})$$

$$\frac{L}{D_o} = 1.625$$

$$\frac{D_o}{t} = 219.714$$

$$A := 0.0003$$

$$B := 4100$$

$$P_a := \frac{4 \cdot B}{3 \cdot \left(\frac{D_o}{t} \right)}$$

$$P_a = 24.881 \quad (\text{psi})$$

$P_a > P_{dis}$

Tercera iteración:

$$t := \frac{1.3}{25.4}$$

$$t = 0.051 \quad (\text{plg})$$

$$D_o := \phi_{int} + 2t$$

$$D_o = 12.102 \quad (\text{plg})$$

$$\frac{L}{D_o} = 1.626$$

$$\frac{D_o}{t} = 236.461$$

$$A := 0.0002$$

$$B := 2700$$

$$P_a := \frac{4 \cdot B}{3 \cdot \left(\frac{D_o}{t} \right)}$$

$$P_a = 15.224 \quad (\text{psi})$$

$$P_a > P_{\text{dis}}$$

Como se observa que el valor requerido de presión se encuentra próximo en la tercera iteración por tanto se toma el valor obtenido en el último procedimiento ya que satisface los requerimientos de diseño del sistema tanto en presión como en el espesor óptimo, así:

$$t_{\text{cal}} := t \quad \text{Espesor encontrado en la última iteración}$$

$$t_{\text{cal}} = 0.051 \quad (\text{plg})$$

$$t_{\text{req}} := t + CA \quad \text{Espesor requerido} \\ \text{(Sumado la corrosión admisible } CA = 1/16\text{")}$$

$$t_{\text{req}} = 0.114 \quad (\text{plg})$$

$$t_{\text{req_mm}} := t_{\text{req}} \cdot 25.4$$

$t_{\text{req_mm}} = 2.888 \quad (\text{mm})$ Una vez calculado el espesor requerido del cuerpo del recipiente, se procede a determinar el espesor comercial disponible, teniendo como espesor final requerido:

$$t_{\text{comercial}} = 3 \quad (\text{mm})$$

4.3.2.2 Espesor de cabezas

Para la determinación del espesor de cabezas se utilizará la parte UG – 32 de la Sección VIII, div.1, tomando en consideración que se realizará el conformado de cabezas elipsoidales debido a la disponibilidad económica y constructiva existente en el mercado. Para lo cual se requiere tener en cuenta lo siguiente:

Para el cálculo de cabezas elipsoidales el espesor requerido debe ser mayor que los siguientes espesores:

- (1) El espesor calculado por fórmulas para presión interna utilizando como presión de diseño 1.67 veces el valor de la externa y como eficiencia de la junta $E = 1.00$.
- (2) El espesor comprobado por la fórmula $P_a = B/R_o/t$ donde $R_o = 0.9 D_o$, y B debe ser determinado de acuerdo al siguiente procedimiento:

Paso 1: Asumir el valor de t y calcular el valor de A usando la fórmula $A = 0.125/(R_o/t)$
(4.5)

$$t := \frac{1.4}{25.4} \quad (\text{plg})$$

$$t = 0.055$$

$$D_o := \phi_{\text{int}} + 2t$$

$$D_o = 12.11 \quad (\text{plg})$$

$$R_o := 0.9 \cdot D_o$$

$$R_o = 10.899$$

$$A := \frac{0.125}{\frac{R_o}{t}}$$

$$A = 0.0006$$

Paso 2. Ingrese a la tabla aplicable al material FIG. CS – 2 (ver Anexo J), con el valor de A. Moverse verticalmente a la línea correspondiente de temperatura.

Paso 3. Desde el punto de intersección moverse horizontalmente y obtener el valor de B.

$$B := 8500$$

Paso 6. Calcular la máxima presión admisible de trabajo, Pa.

$$Pa := \frac{B}{\frac{Ro}{t}} \quad (4.6)$$

$$Pa = 42.985 \quad (\text{psi})$$

Si la máxima presión admisible de trabajo Pa obtenido mediante la fórmula señalada anteriormente es menor que la presión de diseño, se debe incrementar el espesor y repetir el procedimiento de diseño.

Debido a que la máxima presión admisible de trabajo calculada, $Pa > P_{dis}$, se procede a realizar iteraciones para encontrar el espesor óptimo de trabajo para la presión de diseño.

En base a lo anterior se procede a realizar iteraciones:

Segunda iteración:

$$t := \frac{1}{25.4} \quad (\text{plg})$$

$$t = 0.039$$

$$Do := \phi_{int} + 2t$$

$$Do = 12.079 \quad (\text{plg})$$

$$Ro := 0.9 \cdot Do$$

$$Ro = \frac{0.125}{\frac{Ro}{t}}$$

$$A = 0.0005$$

$$Pa := \frac{7050}{\frac{Ro}{t}}$$

$$Pa = 25.351 \quad (\text{psi})$$

$Pa > P_{dis}$

Tercera Iteración

$$t := \frac{0.7}{25.4} \quad (\text{plg})$$

$$t = 0.028$$

$$D_o := \phi_{\text{int}} + 2t$$

$$D_o = 12.055 \quad (\text{plg})$$

$$R_o := 0.9 \cdot D_o$$

$$R_o = 10.85$$

$$A := \frac{0.125}{\frac{R_o}{t}}$$

$$A = 0.0003$$

$$P_a := \frac{B}{R_o}$$

$$B := 4500$$

$$P_a = 11.43 \quad (\text{psi})$$

$$P_a < P_{\text{dis}}$$

Cuarta Iteración

$$t := \frac{0.8}{25.4} \quad (\text{plg})$$

$$t = 0.031$$

$$D_o := \phi_{\text{int}} + 2t$$

$$D_o = 12.063 \quad (\text{plg})$$

$$R_o := 0.9 \cdot D_o$$

$$R_o = 10.857$$

$$A := \frac{0.125}{\frac{R_o}{t}}$$

$$P_a := \frac{B}{R_o}$$

$$P_a = 11.43 \quad (\text{psi})$$

$$P_a > P_{dis}$$

Como se observa que el valor requerido de presión se encuentra cercano a la presión admisible de trabajo obtenida en la última iteración se toma el valor obtenido en esta ya que satisface los requerimientos de diseño del sistema tanto en presión como en el espesor óptimo.

Obtenido esto se procede a comprobar la primera condición:

$$P_i := 1.67 \cdot P_{dis}$$

$$P_i = 24.304 \quad (\text{Psi}) \quad (\text{Presión de la Condición})$$

$$E_{int} = 1.0 \quad (\text{Eficiencia de la Junta})$$

$$S = 16600 \quad (\text{Psi}) \quad (\text{Esfuerzo admisible del material})$$

(4.7)

$$t_{int} = 0.009 \quad (\text{plg}) \quad t > t_{int}$$

Debido a que el espesor calculado cumple las dos condiciones requeridas para cabezas elipsoidales se toma este valor para determinar el espesor requerido:

$$t_{cal} := t \quad \text{Espesor encontrado en la última iteración}$$

$$t_{cal} = 0.031 \quad (\text{plg})$$

$$t_{req} := t + CA \quad \text{Espesor requerido } (\text{Sumado la corrosión admisible } CA = 1/16")$$

$$t_{req} = 0.041 \quad (\text{plg})$$

Código	Descripción
N1	Ingreso de agua al sistema de tubos de Cobre
N2	Salida de agua del sistema de tubos de Cobre
N3	Toma del Vacuómetro
N4	Toma de la Bomba de Vacío
N5	Apertura para ingreso de aire
N6	Purga

Para la ubicación de bocas en el cuerpo del recipiente se desarrolla el despliegue del cuerpo cilíndrico en el plano, donde se observa la localización de cada una estas:

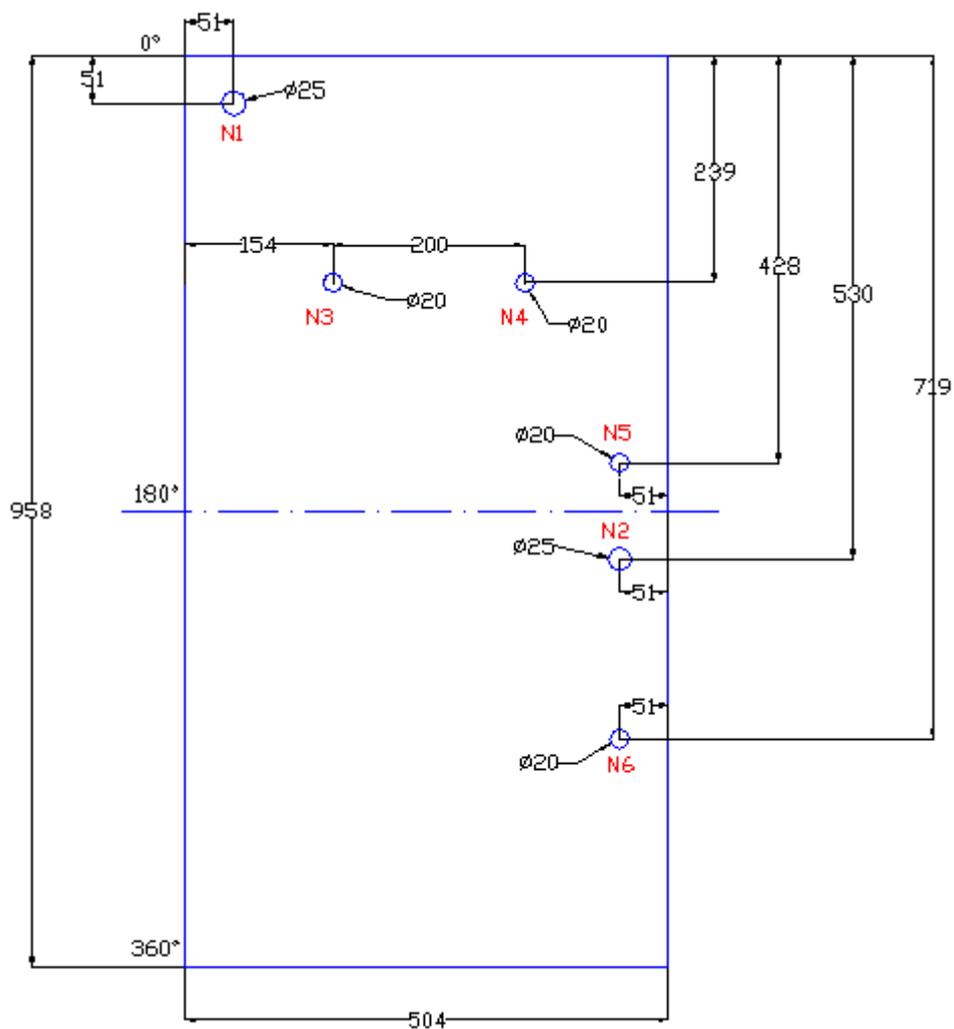


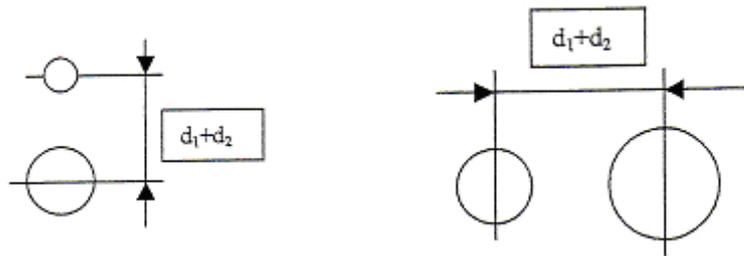
Figura 4.4 Despliegue de bocas en el cuerpo cilíndrico

4.3.3.1 Refuerzos de las aberturas

En función del diámetro y ubicación de las bocas en el recipiente se procede a determinar si existe la necesidad de refuerzos en las mismas, para esto se toma en cuenta **UG – 36(c)(3)** que se refiere a excepciones del refuerzo en cuerpos y cabezas conformadas:

*Las aberturas en recipientes que no están sujetos a rápidas fluctuaciones en la presión **no requieren refuerzo** otro que el inherente a la construcción bajo las siguientes condiciones:*

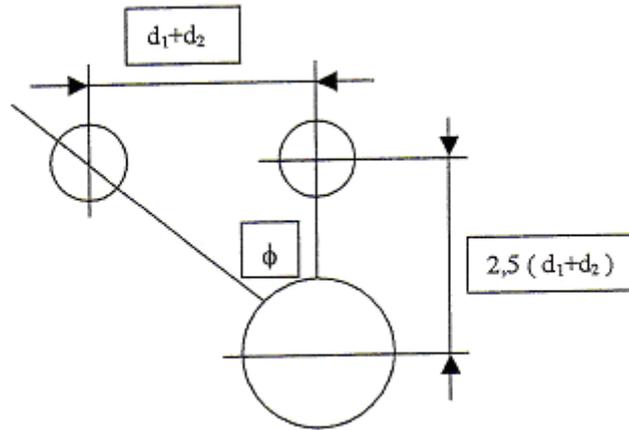
- a) Conexiones soldadas o soldadas con “brazing” con un abertura final no mayor que:
 - 3 ½ pulg. de diámetro – en cuerpos o cabezas de recipientes de 3/8 pulg. o de menor espesor
 - 2 3/8 pulg. de diámetro – en cuerpos o cabezas de recipientes sobre 3/8 pulg. de espesor
- b) Para conexiones roscadas, atornilladas o expandidas en las cuales el hueco cortado en el cuerpo o cabezas no es mayor que 2 3/8 pulg. de diámetro
- c) Ninguna de dos aberturas sin refuerzo deberán tener sus centros mas cerca que la suma de sus diámetros



- d) Ninguna de dos aberturas sin refuerzo en un racimo de tres o más deberán tener sus centros más cerca de lo siguiente:

Para cuerpos cilíndricos o cónicos:

$$(1 + 1.5 \cos \phi)(d_1 + d_2)$$



Para cuerpos con doble curvatura o cabezas

$$2.5(d_1 + d_2)$$

Donde:

ϕ = el ángulo entre la línea de centros de las aberturas y el eje longitudinal del cuerpo

d_1, d_2 = los diámetros finales de dos aberturas adyacentes

Como las aberturas que se encuentran en el diseño del recipiente cumplen con las excepciones anteriormente indicadas, **ninguna de las bocas en este caso requieren refuerzo.**

4.3.4 DETERMINACION DE LA UNION CUERPO - CABEZA

Por motivos de operación del recipiente es necesario que una de las cabezas sea móvil por lo que se requiere una unión no permanente entre el cuerpo y la cabeza, razón por la cual se ha diseñado un tipo de junta como se señala en la **Figura 4.5**

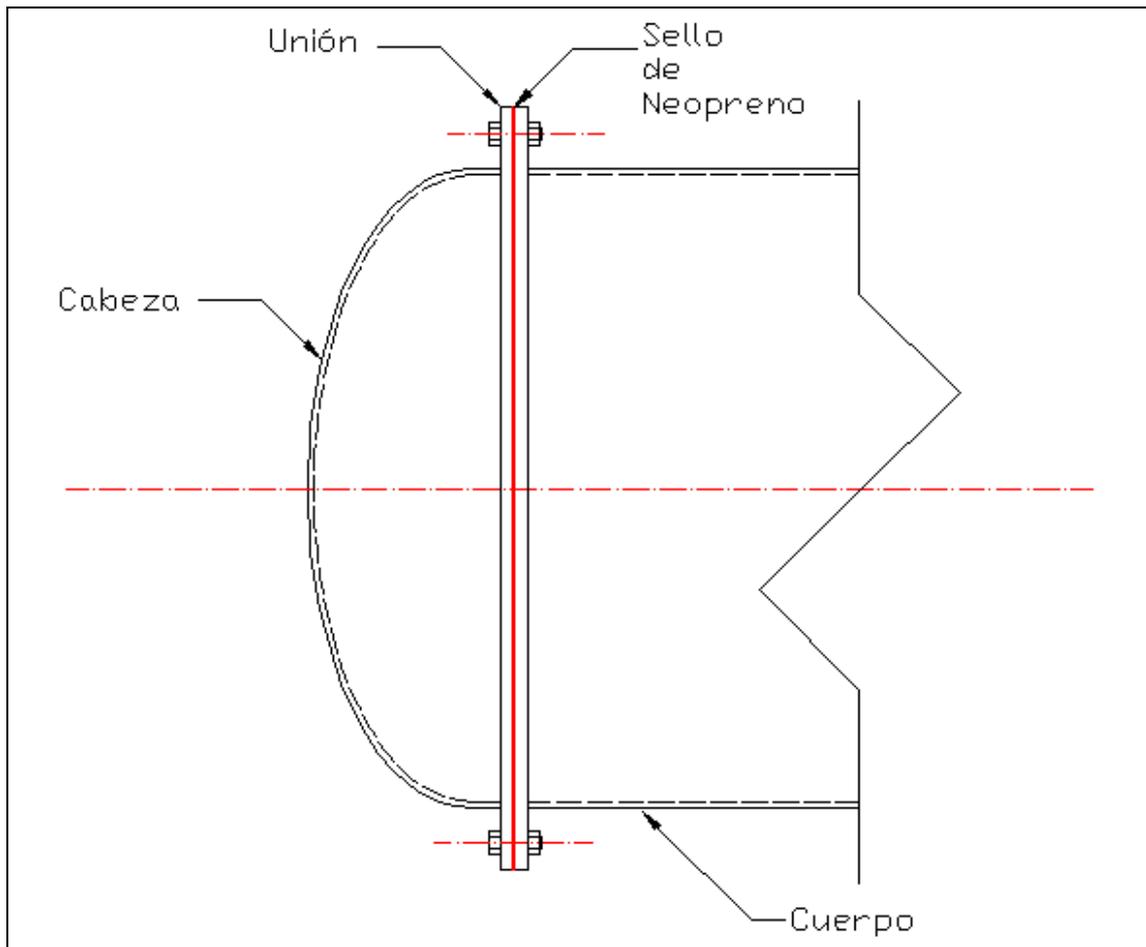


Figura 4.5 Esquema de la unión cuerpo - cabeza

Esta unión consiste en dos anillos soldados a tope con el cuerpo y cabeza respectivamente, a manera de una brida Blind, no tiene cuello y es soldada a tope con el cuerpo cilíndrico, entre los cuales se coloca el sello de neopreno para obtener un sellado total del recipiente al vacío, unidos entre sí a manera de una junta emperrada, como se observa en la **Figura 4.6**

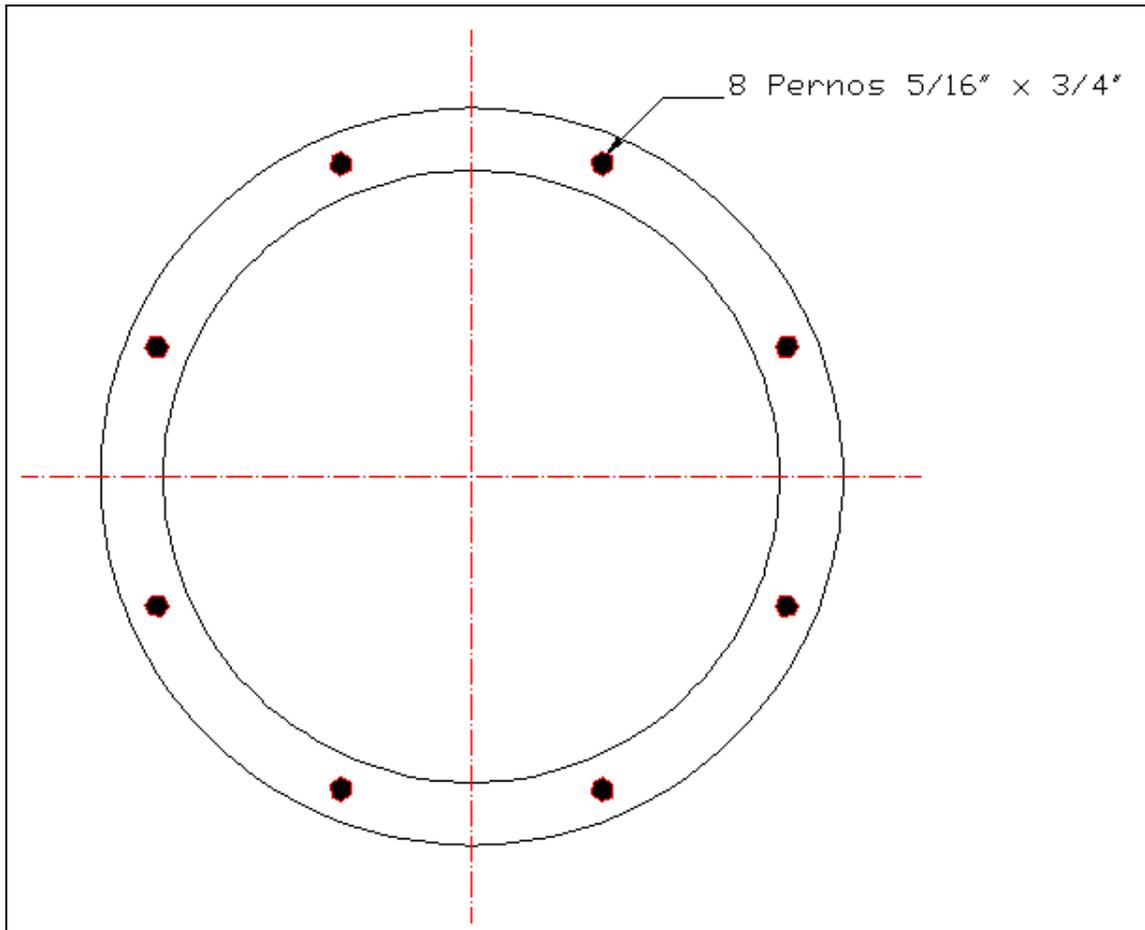


Figura 4.6 Esquema de la junta empernada

Debido a que el recipiente está sometido a vacío, la junta no soporta esfuerzos que traten de separar la unión, sino por el contrario, estos tratan de unirlos debido al efecto que produce el vacío, por tanto los pernos no están sujetos a ningún tipo de esfuerzo y su única función es mantener la cabeza unida al cuerpo en el inicio del proceso de vacío, como se señala en la **Figura 4.7**

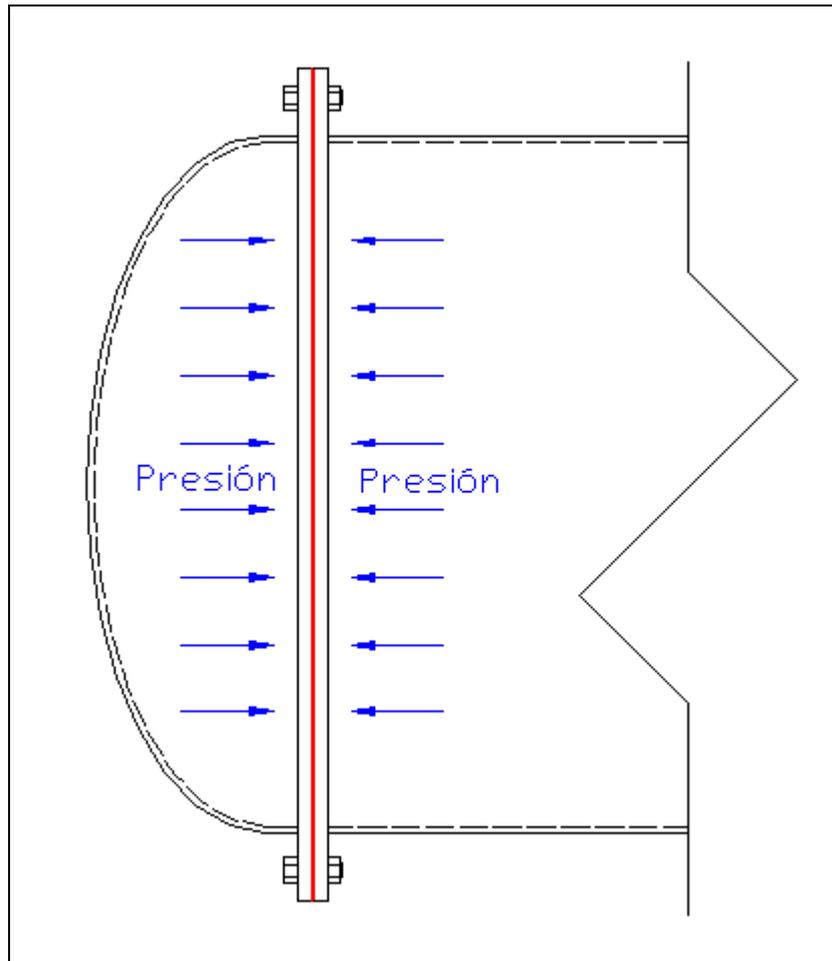


Figura 4.7 Efecto de la presión de vacío en la junta

El anillo de junta tiene como diámetro interior $\phi_{int} = 310.8$ (mm) igual a el diámetro exterior del recipiente debido a que están soldados a tope; el diámetro exterior es función de la distancia entre el orificio para el perno y el borde externo de la junta, considerando el diámetro de pernos: $\phi_{pernos} = 344.5$ (mm) ; valor al cual se añade dos veces el diámetro del orificio teniendo como diámetro exterior del anillo $\phi_{ext} = 374.8$ (mm), como se observa en la **Figura 4.8**.

El espesor del anillo es el doble del espesor del recipiente, por razones constructivas y de soldadura, ya que este tipo de anillo es el que se encuentra disponible en le mercado. $t_{anillo} = 6$ (mm).

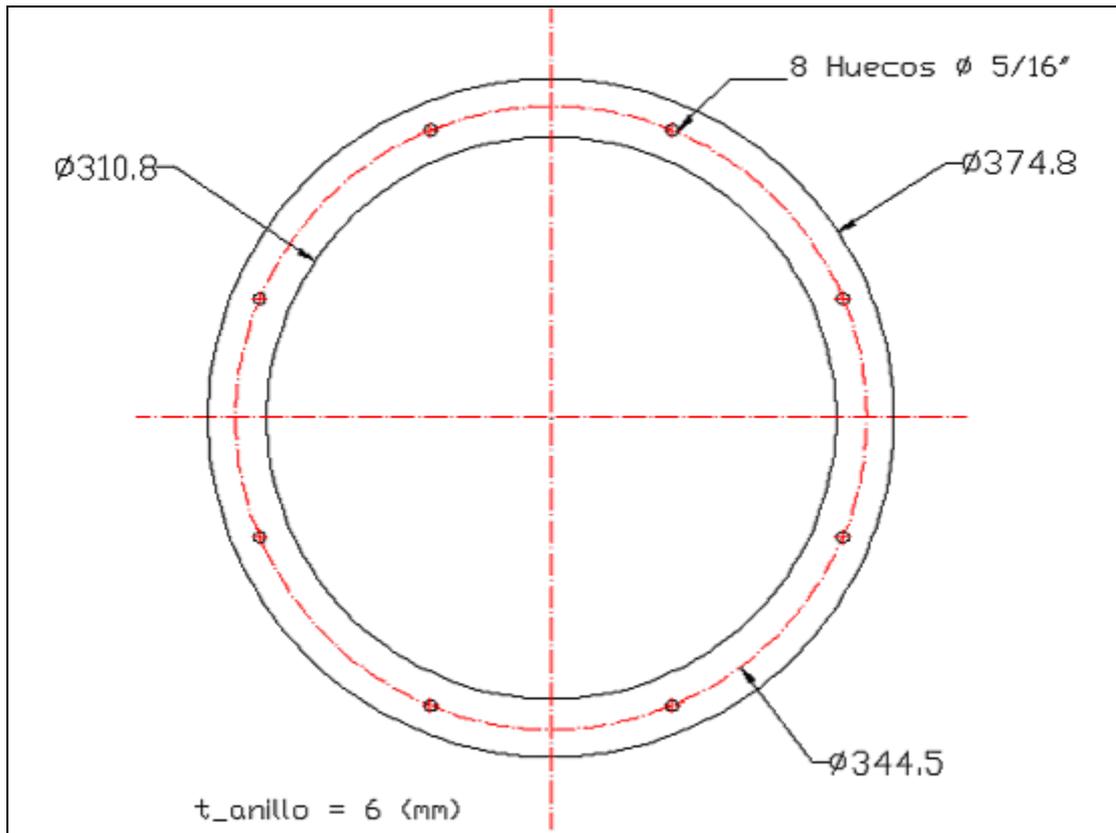


Figura 4.8 Dimensiones del anillo

4.4 SELECCIÓN DE LA BOMBA DE VACÍO

Los parámetros determinantes para la selección en una bomba de vacío son:

- El vacío límite
- La velocidad de bombeo.

El vacío límite requerido en el proceso es 0.1 atm. equivalente a 76 Torr. en unidades de vacío; debido a que con esta presión la temperatura de evaporación del agua es 45.4 °C, valor correspondiente al señalado para secado de granos mencionados en capítulos anteriores.

La velocidad de bombeo es función directa del volumen del recipiente, por lo se procede a determinar el volumen en el interior del mismo:

Volumen de cabeza

$v_{\text{cabeza}} = 0.98$ (galones); Volumen para una cabeza elipsoidal 2:1 con un diámetro interior de 12 pulg sin incluir el faldón. Ver anexos (Volume of Shells and Heads),

$$v_{\text{cabeza}} = 3.707 \text{ (lt)}$$

Volumen del cuerpo

Por motivos de cálculo se añadirá a la longitud del cuerpo la longitud del faldón para el cálculo del volumen total del cuerpo cilíndrico:

$$L := 0.5 \quad (\text{m})$$

$$L_{\text{faldón}} := 0.02 \quad (\text{m})$$

$$LT := L + 2 \cdot L_{\text{faldón}}$$

$$LT = 0.54 \quad (\text{m})$$

$$\phi_{\text{int}} := 0.304 \text{ m}$$

$$V_{\text{cilindro}} := \frac{1}{4} \phi_{\text{int}}^2 \cdot \pi \cdot LT$$

$$V_{\text{cilindro}} = 0.039 \quad (\text{m}^3)$$

$$V_{\text{cilindro}_l} := V_{\text{cilindro}} \cdot 10^3 \quad (\text{lt})$$

Para el cálculo del volumen total se procede a sumar el volumen del cilindro y el volumen de las dos cabezas:

$$V_{\text{total}} := V_{\text{cilindro}_l} + 2 \cdot V_{\text{cabeza}}$$

$$V_{\text{total}} = 46.816 \quad (\text{lt})$$

Debido a que las bombas de vacío están dimensionadas en unidades del Sistema Inglés se procede a convertir a estas:

$$1 \text{ bbl} = 42 \text{ gal}$$

$$1 \text{ gal} = 3.785 \text{ lt}$$

$$V_{\text{total_bbl}} = 46.816 \cdot (\text{lt}) \cdot \left[\frac{1 \cdot (\text{gal})}{3.785 \cdot (\text{lt})} \right] \cdot \left[\frac{1 (\text{bbl})}{42 (\text{gal})} \right]$$

$$V_{\text{total_bbl}} = 0.294 \quad (\text{bbl})$$

Por requerimientos del proceso el tiempo de vaciado es un minuto.

El tiempo de vaciado es función de:

- Volumen del recipiente (bbl)
- Presión inicial (Torr)
- Presión Final (Torr)
- Caudal de la bomba (cfm; pies cúbicos por minuto)

En base a estas variables el tiempo de vaciado de una bomba queda definido por el siguiente modelo:

$$\theta = 2.3 \cdot \left(\frac{V_{\text{total}}}{\text{caudal_bomba}} \right) \cdot \log \left(\frac{P_o}{P_f} \right) \quad \begin{array}{l} \text{Tiempo de vaciado de una bomba;} \\ \text{ec. (4.1)} \end{array}$$

De la ecuación (4.1) se procede a calcular el caudal de la bomba ya que son conocidos los otros parámetros:

$$\theta_1 := \frac{1}{60} \quad (\text{horas}) \quad \text{Tiempo de vaciado requerido, tiempo= 1 min}$$

$$P_o := 760 \quad (\text{Torr}) \quad \text{Presión inicial del recipiente = Presión atmosférica}$$

$$P_f := 76 \quad (\text{Torr}) \quad \text{Presión final del recipiente = 1/10 Presión atmosférica}$$

$$\text{caudal_bomba} := 2.3 \cdot \left(\frac{V_{\text{total_bbl}}}{\theta_1} \right) \cdot \log \left(\frac{P_o}{P_f} \right)$$

$$\text{caudal_bomba} = 40.64 \quad \left(\frac{\text{bbl}}{\text{h}} \right)$$

$$\text{caudal_cfm} := \frac{\text{caudal_bomba}}{10.686} \quad \text{CXXX}$$

$$\text{caudal_cfm} = 3.803 \quad (\text{cfm})$$

En base al caudal calculado se procede a seleccionar la bomba de vacío en función del caudal comercial:

caudal_comercial = 4 (cfm)

Según la **Figura 2.18**: Rangos de presión para bombas de vacío, se procede a seleccionar el tipo de bomba de vacío requerida para la presión final de trabajo, $P_f = 76$ Torr.

De este gráfico se determina que la bomba requerida para el proceso es del tipo de **Sello de Anillo Líquido**; con las siguientes características:

Bomba de Anillo Líquido:

Las bombas de vacío de anillo líquido se utilizan para moderadas condiciones de carga. Un sellante líquido con agua se utiliza con el vacío operacional límite a cerca de 30 torr. Se puede incrementar el vacío requerido con el uso del aceite, de glicol o de otro líquido. Este tipo de bomba es deseable porque puede ser sellado con un líquido compatible con el proceso que dañaría otro tipo de bombas (es decir: engrase sellado) y es relativamente barato. La confiabilidad es alta debido a su simplicidad.

Por lo tanto la bomba requerida de acuerdo a las características descritas anteriormente es:

Tabla 4.2 Características de la bomba de vacío seleccionada

CARACTERISTICAS TECNICAS DE LA BOMBA DE VACIO			
Potencia	½ HP	Marca	TGM
Velocidad Angular	1725 RPM	Distribuidora	TSM
Frecuencia	60 Hz	Modelo C55JXGYT-3876 CAT.	
	1 Fase	Temp. Operación 40 °C	
Amperaje	7.3 A	Vacío límite 76 Torr	
Voltaje	115 V		
Aislamiento clase 3			
Protegida térmicamente			
Caudal	4 cfm		

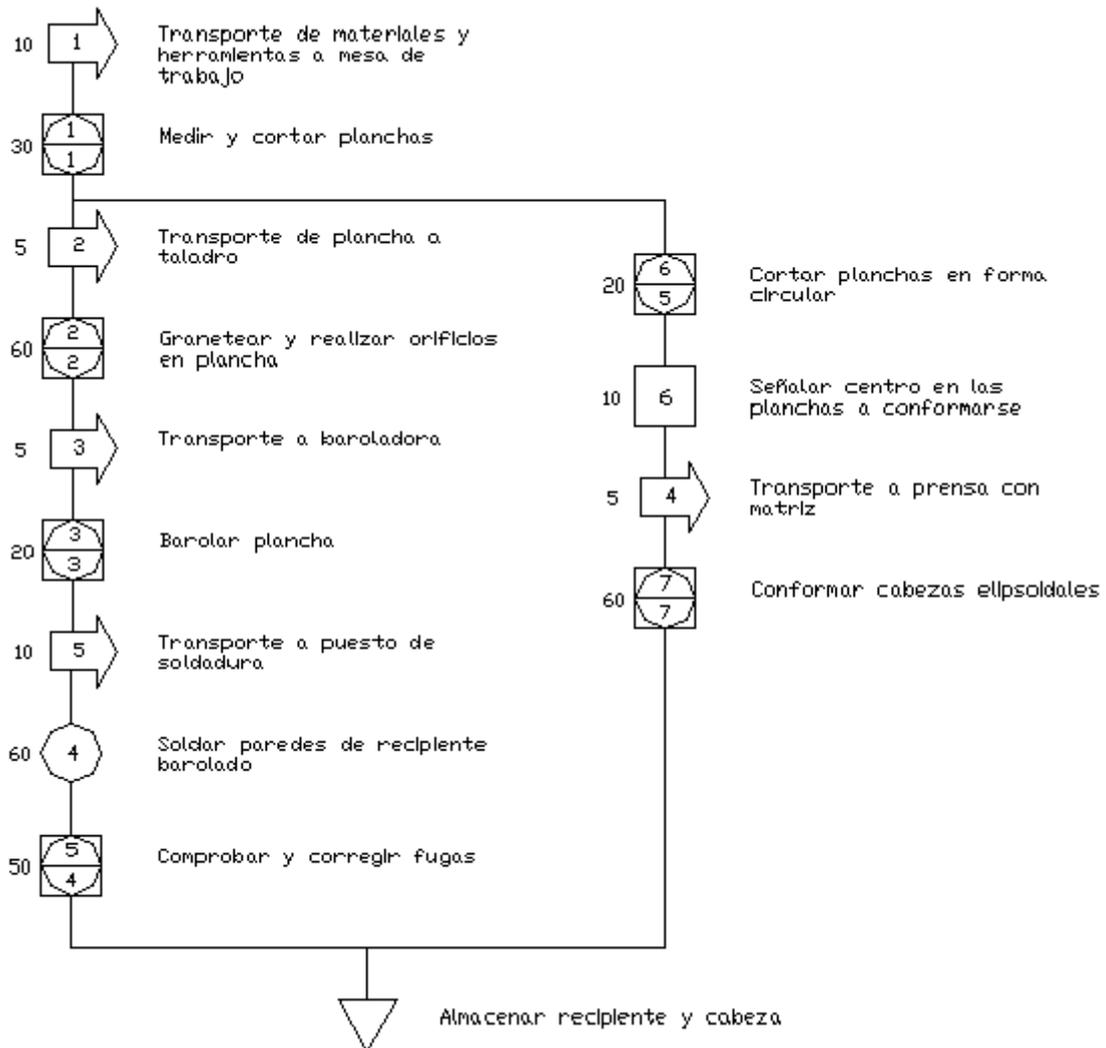
CAPITULO 5

5. CONSTRUCCION DEL MODELO.

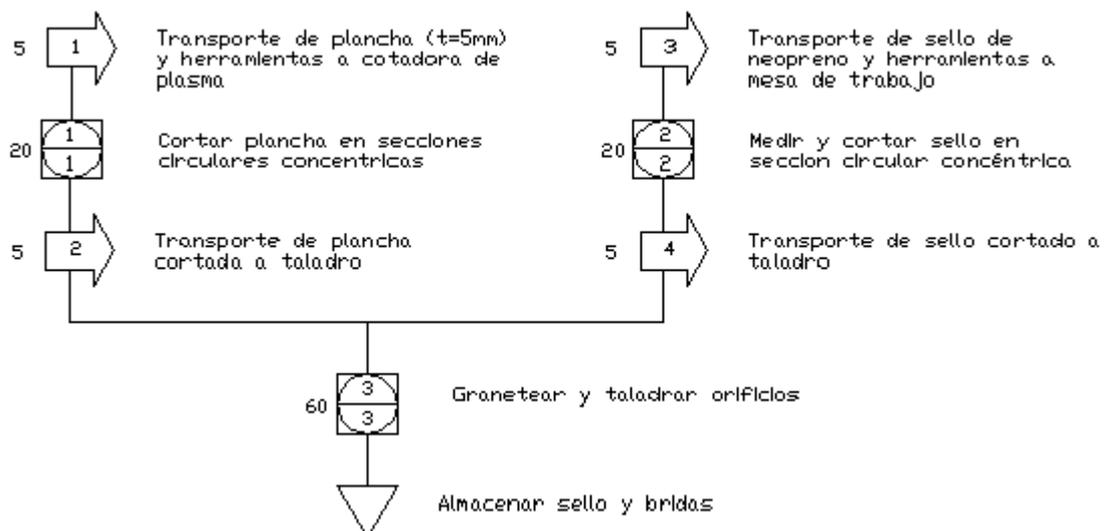
5.1 CONSTRUCCIÓN DE PARTES Y PIEZAS.

Para la construcción del prototipo se utilizarán diagramas de procesos según codificación ASME, indicando la secuencia de operaciones realizada con el respectivo tiempo estimado.

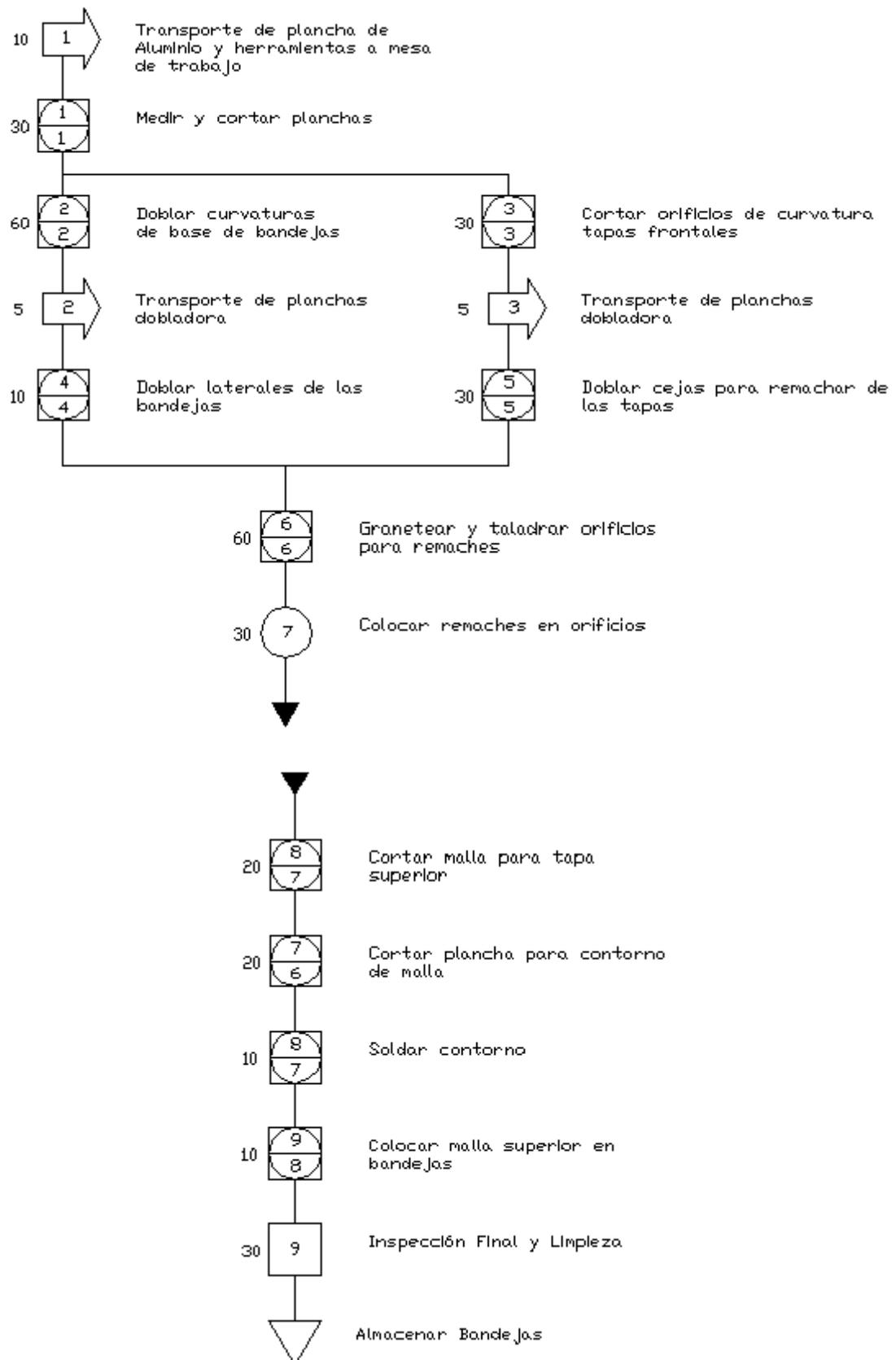
5.1.1 CONFORMAR CUERPO CILINDRICO Y CABEZAS (SSO1):



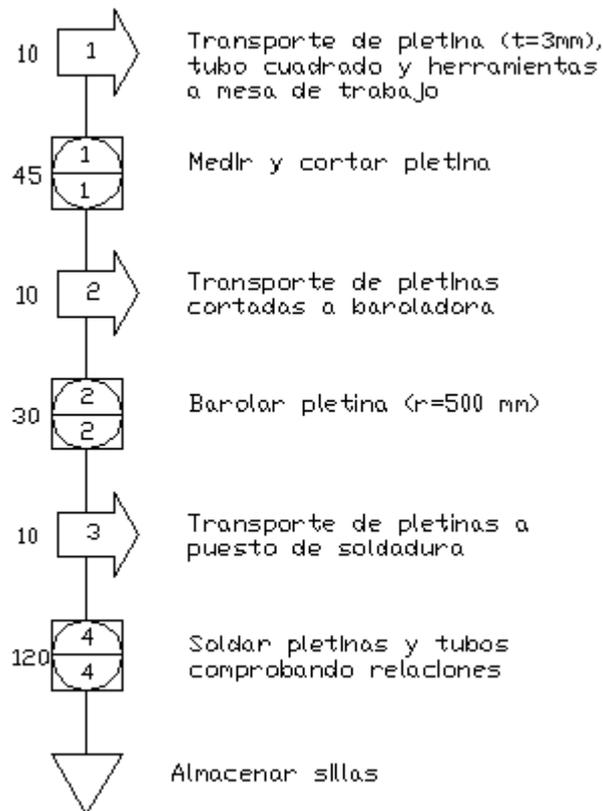
5.1.2 ELABORAR BRIDAS Y SELLO (SSO2):



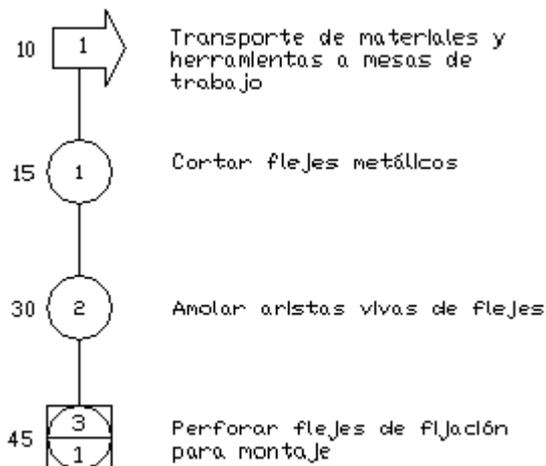
5.1.3 ELABORAR BANDEJAS (SO3):



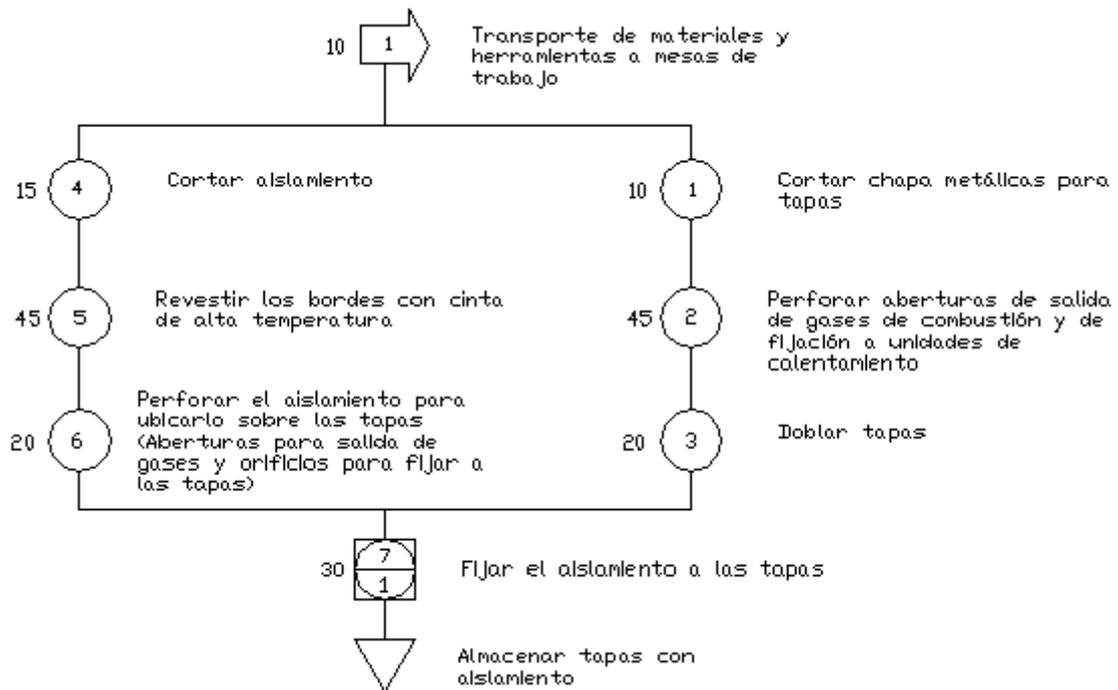
5.1.4 ELABORAR SILLAS (SO4):



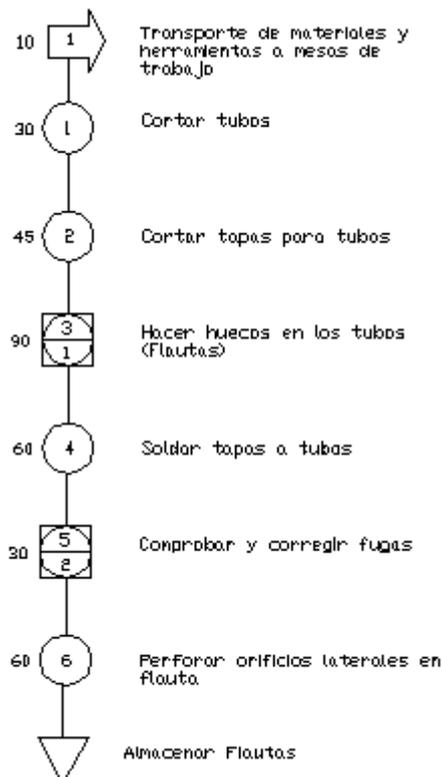
5.1.5 CONSTRUIR FLEJES METÁLICOS DE LA UNIDAD DE CALENTAMIENTO (SO5):



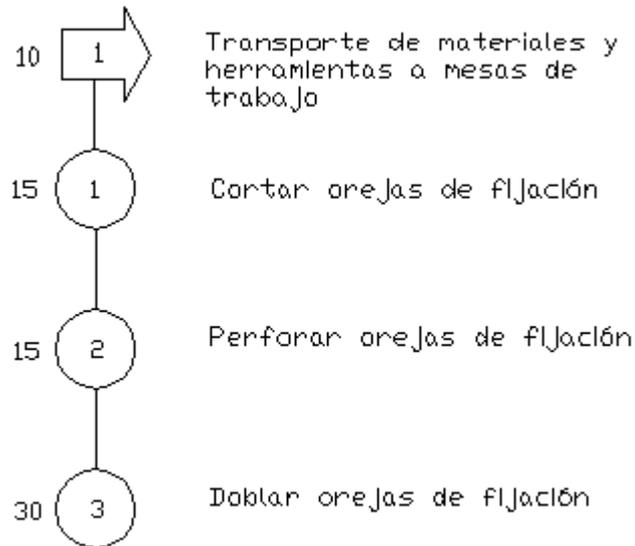
5.1.6 CONSTRUIR TAPAS CON AISLAMIENTO (SO6):



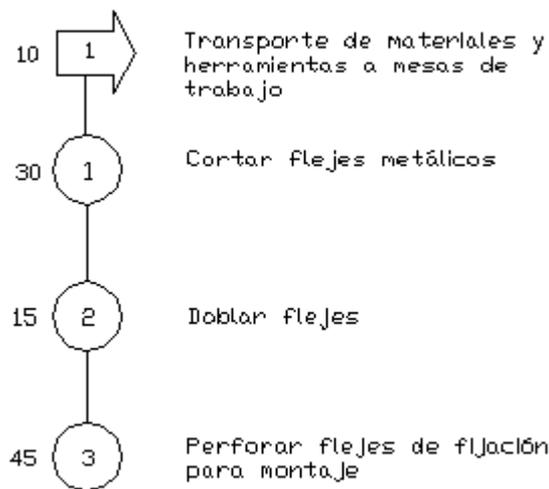
5.1.7 CONSTRUIR FLAUTAS (SO7):



5.1.8 CONSTRUIR OREJAS DE FIJACIÓN DEL QUEMADOR (SO8):

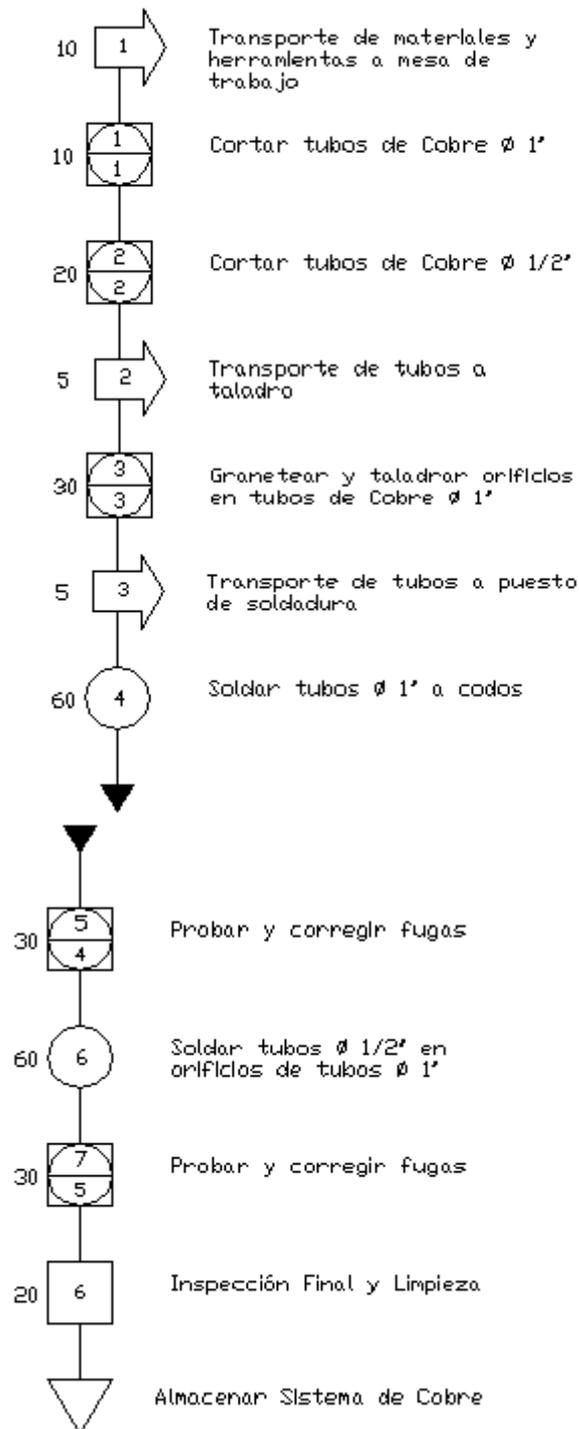


5.1.9 CONSTRUIR FLEJES DE FIJACIÓN DEL QUEMADOR (SO9):

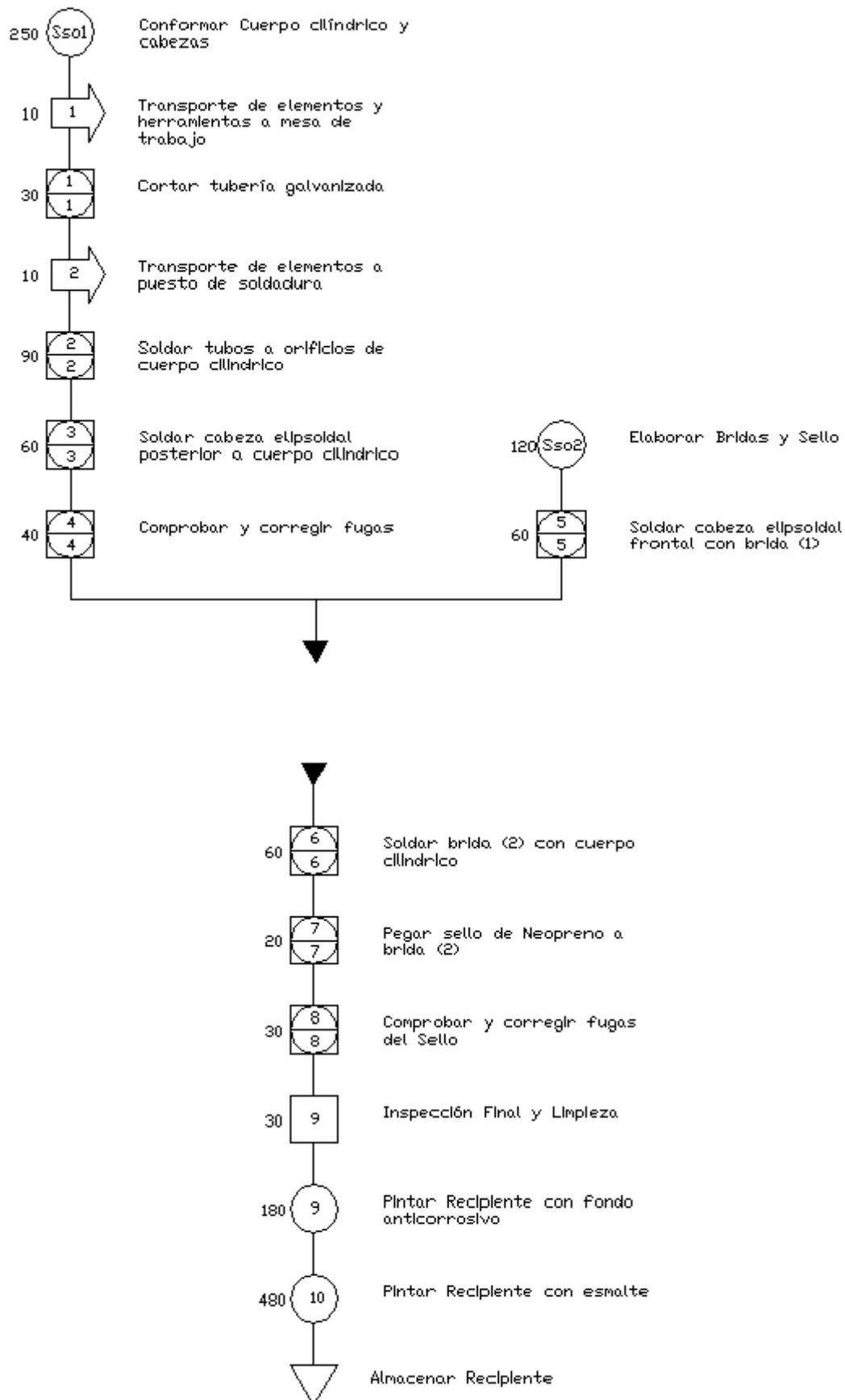


5.2 ENSAMBLE DE SISTEMAS Y SUBSISTEMAS.

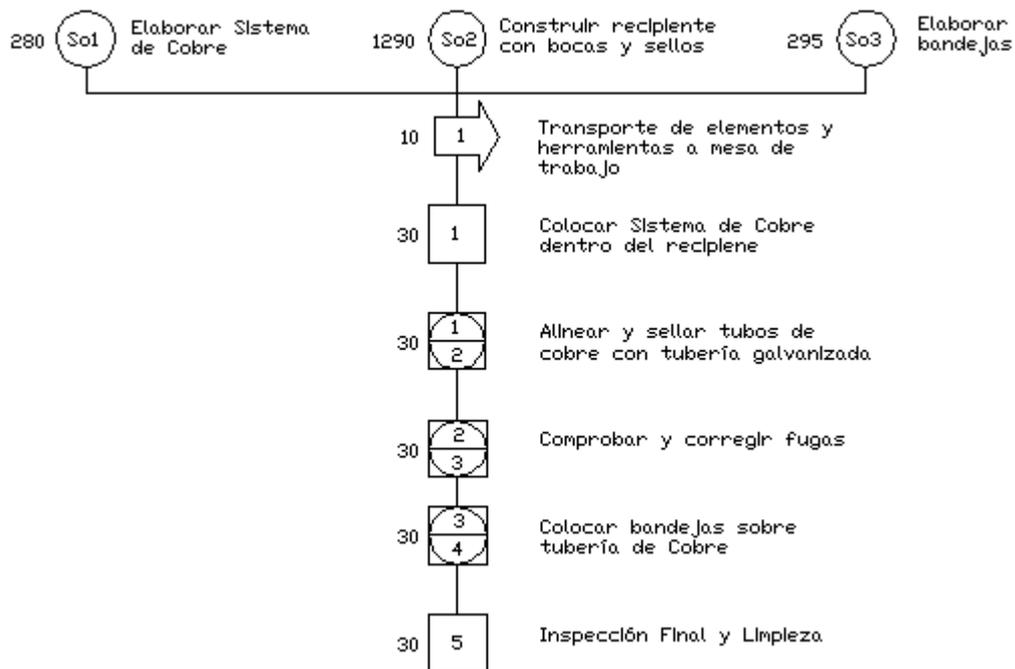
5.2.1 ELABORAR SISTEMA DE COBRE (SO1):



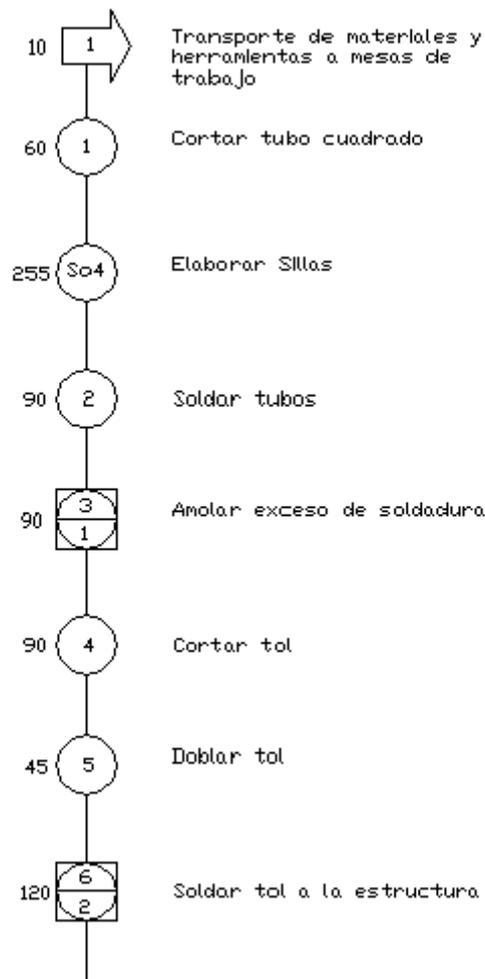
5.2.2 CONSTRUIR RECIPIENTE CON BOCAS Y SELLOS (SO2):

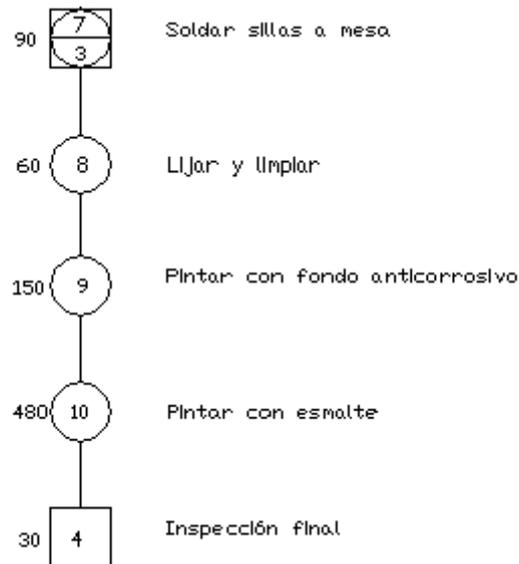


5.2.3 CONSTRUIR CÁMARA DE SECADO (O1):

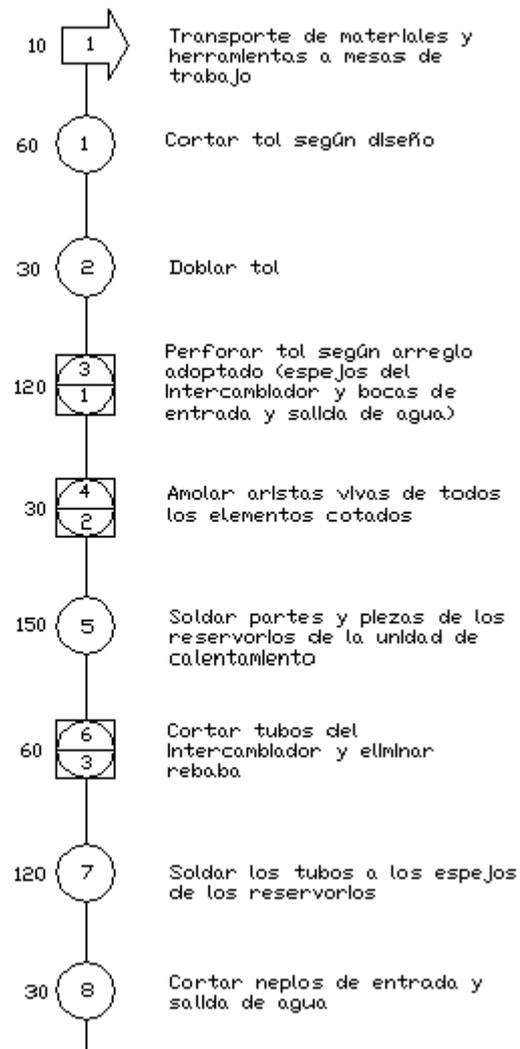


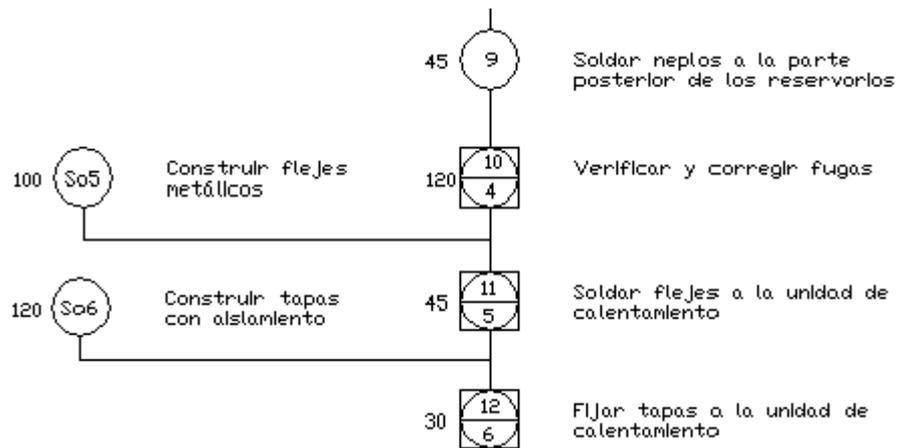
5.2.4 CONSTRUIR MESA DE SOPORTE (O2):



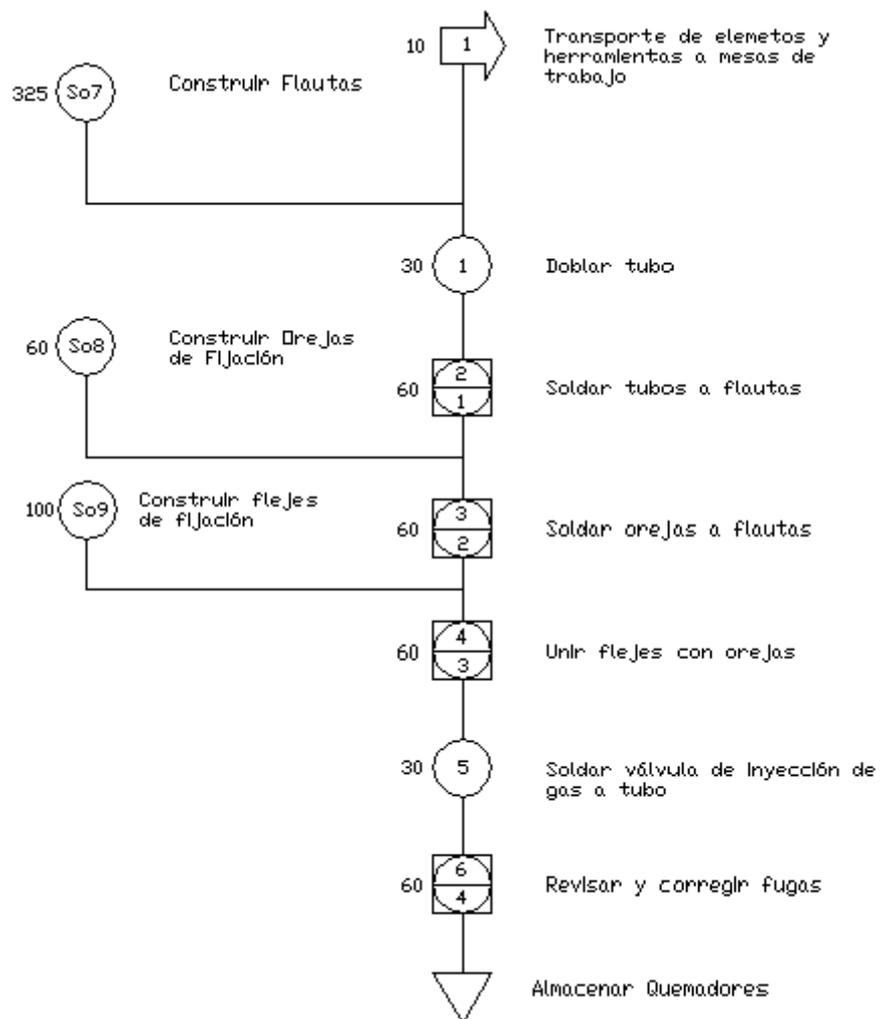


5.2.5 CONSTRUIR UNIDADES DE CALENTAMIENTO (O3):

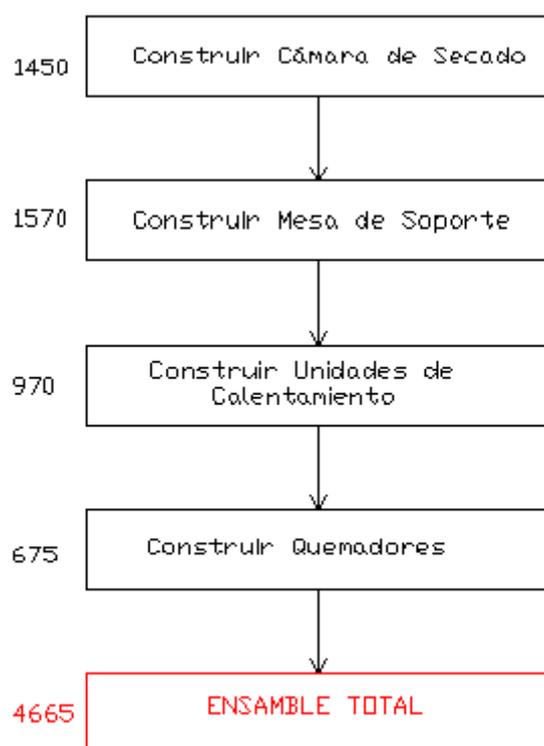




5.2.6 CONSTRUIR QUEMADORES (O4):



5.2.7 ENSAMBLE TOTAL (O):



5.3 CONEXIÓN DE ACOPLER Y ACCESORIOS.

Tabla 5.1 Conexión de acoples y accesorios

Ord.	Descripción	Tiempo (min)
1	Realizar conexiones eléctricas de la bomba	60
2	Sujetar bomba de agua a la mesa	60
3	Conectar acoples a entrada y salida de la bomba	20
4	Conectar acoples a entrada y salida del quemador	20
5	Conectar acoples de manguera a la entrada y salida de agua del recipiente	45
6	Conectar unión entre salida de la bomba y entrada al quemador	45
7	Conectar unión flexible entre salida del quemador y entrada de agua al recipiente	20
8	Conectar unión flexible entre salida de agua del recipiente y entrada al reservorio	20
9	Conectar vacuómetro al recipiente	30
10	Conectar toma de succión a la bomba de vacío en el recipiente	10
11	Conectar llaves de purga en el recipiente	10
12	Conectar llaves de entrada de aire al recipiente	10
TIEMPO TOTAL		350

5.4 MONTAJE.

Tabla 5.2 Montaje

Ord.	Descripción	Tiempo (min)
1	Sujetar quemadores a la mesa	60
2	Sujetar unidades de calentamiento a la mesa	60
3	Colocar reservorio en la mesa	10
4	Colocar bomba sobre la mesa	30

5	Colocar recipiente sobre las sillas	10
6	Cubrir con aislante las tuberías y mangueras	90
TIEMPO TOTAL		260

CAPITULO 6

6. ENSAYOS DEL PROTOTIPO.

6.1 PROTOCOLO DE PRUEBAS.

6.1.1 COMPROBACIÓN DE PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO DE LA BOMBA DE VACÍO.

Objetivo:

- Comprobar los parámetros de caudal y presión de la bomba de vacío en operación

Marco Teórico:

Información referente al marco teórico se encuentra en la sección 4.4 Selección de la bomba de vacío.

Materiales y equipos⁶:

- Bomba de vacío
- Vacuómetro
- Recipiente de presión
- Cronómetro

Procedimiento:

⁶ Las características técnicas de lo equipos e instrumentos utilizados en todos los ensayos se encuentran en el Anexo N.

1. Sellar el recipiente
2. Encender la bomba de vacío
3. Cronometrar el tiempo en que el recipiente alcance la presión de operación (P= 76 Torr)
4. Determinar el caudal de la bomba mediante la expresión:

$$\text{caudal_bomba} := 2.3 \cdot \left(\frac{V_total_bbl}{\theta_1} \right) \cdot \log \left(\frac{P_o}{P_f} \right)$$

Donde:

V_total_bbl = Volumen total del recipiente 0.294 (bbl)

θ_1 = Tiempo medido (horas)

P_o = Presión inicial del recipiente 760 Torr

P_f = Presión final del recipiente 76 Torr

5. Transformar el caudal determinado a cfm mediante la expresión:

$$\text{caudal_cfm} := \frac{\text{caudal_bomba}}{10.686} \quad (6.2)$$

6. Determinar el error porcentual entre el caudal teórico y el experimental mediante el uso de la ec. 6.3

$$\text{Error}(\%) = \frac{\text{Caudal_teorico} - \text{Caudal_experimental}}{\text{Caudal_teorico}} \cdot 100 \quad (6.3)$$

Tabla:

Medición	Tiempo		Caudal		Error (%)
	(seg)	(horas)	(bbl/h)	(Cfm)	
1	56.10	0.02	43.34	4.06	1.40
2	57.02	0.02	42.64	3.99	0.24
3	58.70	0.02	41.42	3.88	3.09
4	56.40	0.02	43.11	4.03	0.86
5	58.64	0.02	41.47	3.88	2.99
Error promedio (%)					1.72

Observaciones:

En las pruebas realizadas en la bomba de vacío se encontró problemas con el sello, debido a que la bomba se encuentra arrojando aceite, por lo que se recomienda cambiar los sellos en forma inmediata.

6.1.2 DETERMINACIÓN DEL CONSUMO DE GAS EN EL PROCESO

Objetivo:

- Determinar el consumo de gas en el proceso de secado

Marco Teórico:

Información referente al marco teórico se encuentra en la sección de energía

2.2.4 Fuentes

Materiales y equipos:

- Sistema de de secado de arroz
- Arroz con cáscara (5 kg)
- Balanza
- Termómetro

Procedimiento:

1. Pesar el cilindro de gas previo a la operación.



Figura 6.1 Pesaje del cilindro previo al proceso

2. Distribuir los 5kg de arroz en las bandejas del interior del recipiente y sellarlo.



Figura 6.2 Sellado del recipiente de vacío

3. Encender la bomba de vacío.



Figura 6.3 Encendido de la bomba de vacío

4. Encender el sistema de calentamiento del agua.
5. Esperar que el sistema alcance la temperatura de operación (55 - 60 °C)
6. Alcanzada la temperatura de operación cronometrar el tiempo de secado (2 horas)



Figura 6.4 Control de los parámetros de operación (presión y temperatura)

7. Una vez terminado el proceso, pesar nuevamente el tanque de gas para determinar el consumo.



Figura 6.5 Pesaje del cilindro posterior al proceso

8. La diferencia entre el peso inicial y el peso final, es la cantidad de gas requerida para el proceso.
9. Con el valor obtenido, calcular la energía requerida mediante la ecuación (6.4) :

$$Q = m_{\text{gas}} \cdot Hi \quad (6.4)$$

Donde:

m_{gas} = masa consumida de gas (kg)

Hi = Poder calorífico inferior del GLP

Tabla 6.1 Propiedades del GLP

Propiedades del GLP	
Densidad GLP (kg/l)	0.54
Hi (kcal/l)	9100
Hi (kcal/kg)	16851.85
Hi (kJ/kg)	70558.70

Tabla:

Medición	Masa inicial		Masa final		Masa consumida	Energía consumida
	(lb)	(kg)	(lb)	(kg)	(kg)	(kJ)
1	67	30.43	64	29.06	1.36	96129.02
2	64	29.06	61.5	27.93	1.14	80107.52
Promedio:					1.25	88118.27

Observaciones:

El consumo de gas es bajo debido a que el sistema de secado se encuentra totalmente aislado lo que evita pérdidas y se conserva el calor por el proceso de recirculación y el alto calor específico del agua ($c_p = 4.187 \text{ kJ/kg K}$)

6.1.3 DETERMINACION DE LA HUMEDAD FINAL DEL GRANO.

Objetivo:

- Determinar el porcentaje de humedad del arroz con cáscara

Marco Teórico:

Para determinar la humedad de los granos se somete una muestra de granos de peso conocido al secado y se calcula el porcentaje de humedad a través del peso que se pierde durante el secado, mediante las ecuaciones:

$$H_{bh} = \frac{m_w}{m_w + m_s} = \frac{m_w}{m_t} \quad (6.5)$$

$$H_{bs} = \frac{m_w}{m_s}$$

(6.6)

Donde:

H_{bh} = Humedad en base húmeda

H_{bs} = Humedad en base seca

m_w = Masa de agua (kg)

m_t = Masa total (kg)

m_s = Masa seca (kg)

Materiales y equipos:

- Arroz con cáscara inicial al proceso de secado
- Balanza
- Medidor de Humedad

Procedimiento:

1. Pesar la muestra de 5 kg para colocar en las bandejas



Figura 6.6 Pesaje de las muestras

2. Colocar las bandejas en el recipiente e iniciar el proceso de secado



Figura 6.7 Ubicación de bandejas en el recipiente

3. Una vez finalizado el proceso extraer el arroz con cáscara del recipiente.



Figura 6.8 Muestras extraídas del recipiente posterior al proceso de secado

4. Pesar en la balanza



Figura 6.9 Pesaje de la muestra posterior al proceso de secado

5. Determinación de la humedad final del grano



Figura 6.10 Muestra de arroz posterior al proceso de secado

Tablas:

Tabla 6.2 Propiedades iniciales del arroz

Datos Iniciales del Arroz	
Humedad inicial (%)	19.7
Masa Agua inicial (kg)	0.99
Masa Seca (kg)	4.02

Medición	Masa Inicial (kg)	Masa Final (kg)	Masa Final de Agua (kg)	Humedad en base húmeda (%)
1	5	4.532	0.52	11.41
2	5	4.521	0.51	11.19
Humedad Promedio (%)				11.30

Observaciones:

El porcentaje de humedad inicial en base húmeda fue determinado en la Piladora “DON GONZALO”, ubicada en la población de Montalvo, provincia de Los Ríos, proveedores del arroz con cáscara para las pruebas, mediante su medidor de humedad:

Tabla 6.3 Características técnicas del medidor de humedad

Marca	Kett
Modelo	PM-400
Especificación	Grain Moisture Tester
Tiempo de Operación	10 años

Obteniéndose un porcentaje de humedad inicial en base húmeda de 19.7 %.

El porcentaje de humedad final en base húmeda se lo determina a partir del peso final de la muestra posterior al proceso de secado mediante la utilización de las formulas indicadas anteriormente, teniéndose una humedad final en base húmeda de 11.3 %.

6.1.4 INSPECCIÓN DEL PRODUCTO FINAL OBTENIDO.

Objetivo:

- Determinar el porcentaje de impurezas obtenidas en el producto final del proceso de secado

Marco Teórico:

Muestreo

Consiste en retirar pequeñas cantidades de granos, que en su conjunto forman una muestra representativa del lote de granos.

Para que sea representativa, la muestra de granos deberá poseer todas las características del lote. La recolección de la muestra es una operación muy importante para la clasificación del lote de granos y debe ser efectuada de una manera correcta para evitar distorsiones en los datos, lo que podría traer consecuencias desastrosas para el almacenamiento o comercialización del producto.

El muestreo tiene por finalidad determinar el contenido de humedad, impurezas y daños y la clasificación del producto.

Si deseamos estimar una muestra, se debe saber:

- a) El nivel de confianza o seguridad ($1-\alpha$). El nivel de confianza prefijado da lugar a un coeficiente (Z_{α}). Para una seguridad del 95% = 1.96, para una seguridad del 99% = 2.58.

- b) La precisión que deseamos para nuestro estudio.
- c) Una idea del valor aproximado del parámetro que queremos medir. Esta idea se puede obtener revisando la literatura, por estudio pilotos previos. En caso de no tener dicha información se utilizará el valor $p = 0.5$ (50%).

Si la población es finita, es decir conocemos el total de la población y deseásemos saber cuántos del total tendremos que estudiar la respuesta sería:

$$n = \frac{N \cdot Z_{\alpha}^2 \cdot p \cdot q}{d^2 \cdot (N - 1) + Z_{\alpha}^2 \cdot p \cdot q} \quad (6.6)$$

Donde:

N = Total de la población

$Z_{\alpha}^2 = 1.96^2$ (si la seguridad es del 95%)

p = proporción esperada (en este caso 10% = 0.1)

$q = 1 - p$ (en este caso $1 - 0.1 = 0.90$)

d = precisión (en este caso deseamos un 50%).

En base a lo anterior procedemos a determinar el tamaño de la muestra por medio de la ec. (6.6)

$$N := 5 \quad (\text{kg})$$

$$Z_{\alpha} := 1.96 \quad \text{Confiabilidad del 95\%}$$

$$p := 0.1$$

$$q := 1 - p$$

$$n := \frac{d \cdot \sqrt{N \cdot Z_{\alpha}^2 \cdot p \cdot q}}{d^2 \cdot (N - 1) + Z_{\alpha}^2 \cdot p \cdot q}$$

$$n = 1.285 \quad (\text{kg})$$

Por tanto el tamaño requerido de la muestra a analizarse es:

$$n = 1.3 \quad (\text{kg})$$

Muestra que se tomará dos veces después de cada proceso de secado para el posterior análisis de resultados.

Materiales y equipos:

- Arroz con cáscara posterior al proceso de secado
- Balanza

Procedimiento:

1. Extraer la muestra de arroz con cáscara (1.3 kg), posterior al proceso de determinación de humedad.
2. Separar las impurezas, presentes en la muestra extraída.



Figura 6.11 Separación de impurezas de la muestra

3. Pesar el total de impurezas separadas.
4. Determinar el porcentaje de impurezas con respecto al peso total.

Gráficos y Tablas:

Prueba	Medición	Masa de impurezas (kg)	Masa Total (kg)	Impurezas (%)	Producto Aceptable (%)
--------	----------	------------------------	-----------------	---------------	------------------------

1	1	0,052	1,3	4,00	96,00
	2	0,057	1,3	4,38	95,62
2	1	0,061	1,3	4,69	95,31
	2	0,041	1,3	3,15	96,85
Promedio (%)				4,06	95,94

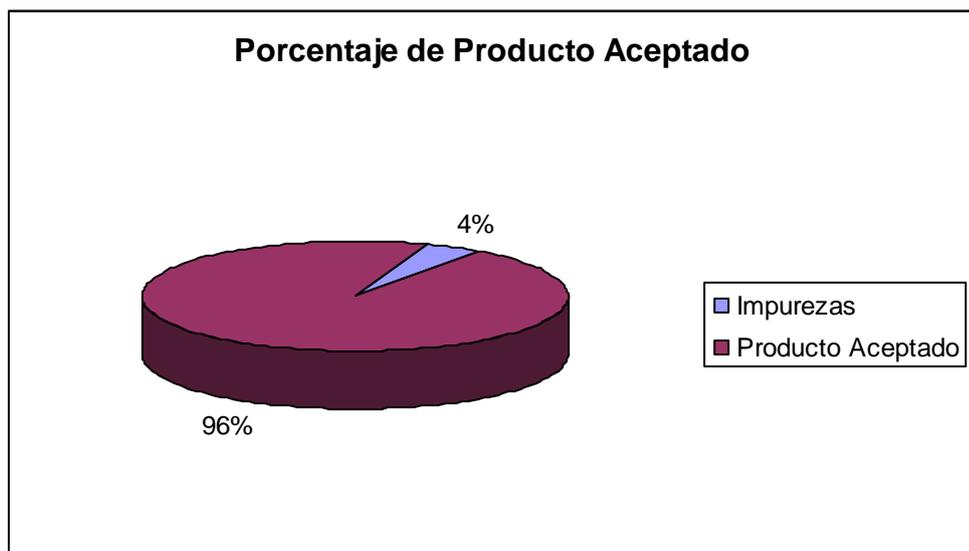


Figura 6.12 Porcentaje de impurezas de la muestra

Observaciones:

En las muestras tomadas se encontró impurezas propias del producto tales como espigas, hojas, cáscaras y residuos sólidos; dentro de los parámetros normales que se encuentran en los centros de acopio de arroz.

6.1.5 PRUEBAS ANÁLOGAS EN UNA MUESTRA DE CONTROL

Objetivos:

- Realizar los ensayos de humedad y porcentaje de impurezas en una muestra de control secada por métodos tradicionales.

Marco Teórico

La teoría que sustenta la realización de los ensayos se encuentra en la sección 6.1.3 y 6.1.4, indicadas anteriormente.

Los métodos tradicionales de Tecnología de secado de granos se encuentran indicados en la parte 2.2 Tecnología de Secado.

Materiales y equipos:

- Arroz con cáscara (5kg)
- Balanza
- Cronómetro

Procedimiento:

1. Dispersar el arroz sobre una superficie expuesta totalmente al sol.



Figura 6.13 Muestra de Arroz secada por método tradicional

2. Dejar en reposo durante 2 horas
3. Recoger el arroz y repetir el procedimiento para determinación de humedad y de porcentaje de impurezas.

Gráficos y Tablas:

Medición	Masa Inicial (kg)	Masa Final (kg)	Masa Final de Agua (kg)	Humedad en base húmeda (%)
1	5	4,841	0,83	17,06
2	5	4,852	0,84	17,25
Humedad Promedio (%)				17,16

Prueba	Medición	Masa de impurezas (kg)	Masa Total (kg)	Impurezas (%)	Producto Aceptable (%)
1	1	0,069	1,3	5,31	94,69
	2	0,063	1,3	4,85	95,15
2	1	0,060	1,3	4,62	95,38
	2	0,070	1,3	5,38	94,62
Promedio (%)				5,04	94,96

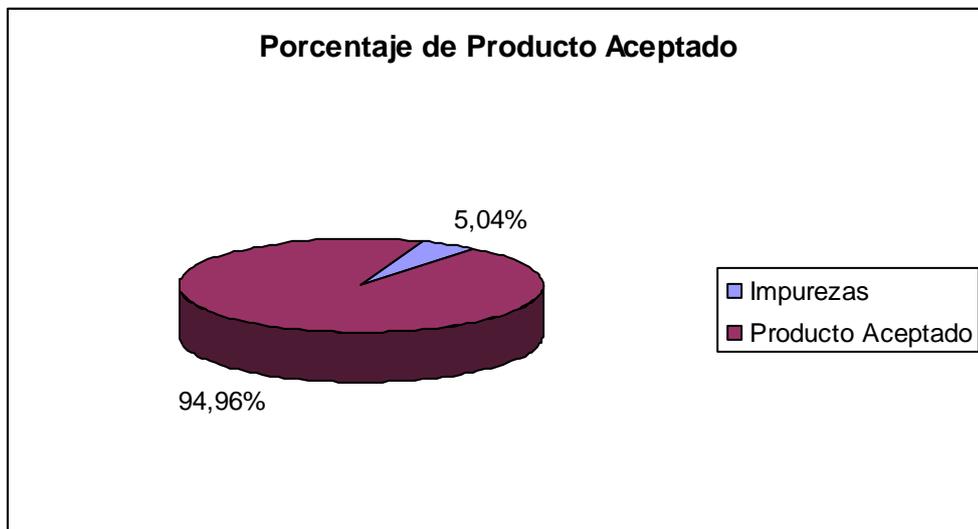


Figura 6.14 Porcentaje de impurezas de la muestra secada por métodos tradicionales

Observaciones:

El método de secado tradicional empleado depende totalmente de las condiciones externas por lo que para el secado se necesita de factores ambientales muy favorables como son: un día despejado y muy soleado para poder realizar los ensayos.

6.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.2.1 COMPARACIÓN ENTRE EL MÉTODO DE SECADO AL VACÍO Y EL MÉTODO TRADICIONAL

Para el análisis de resultados se realiza una comparación entre el método de secado por tecnología de vacío y el método tradicional bajo los mismos parámetros de tiempo de secado (2 horas) y humedad inicial (19.7%).

Tabla 6.4 Comparación de parámetros entre sistemas de secado

Prueba	Secado al Vacío (%)	Secado Tradicional (%)
Humedad	11,30	17,16
Impurezas	4,06	5,04
Producto Aceptable	95,94	94,96

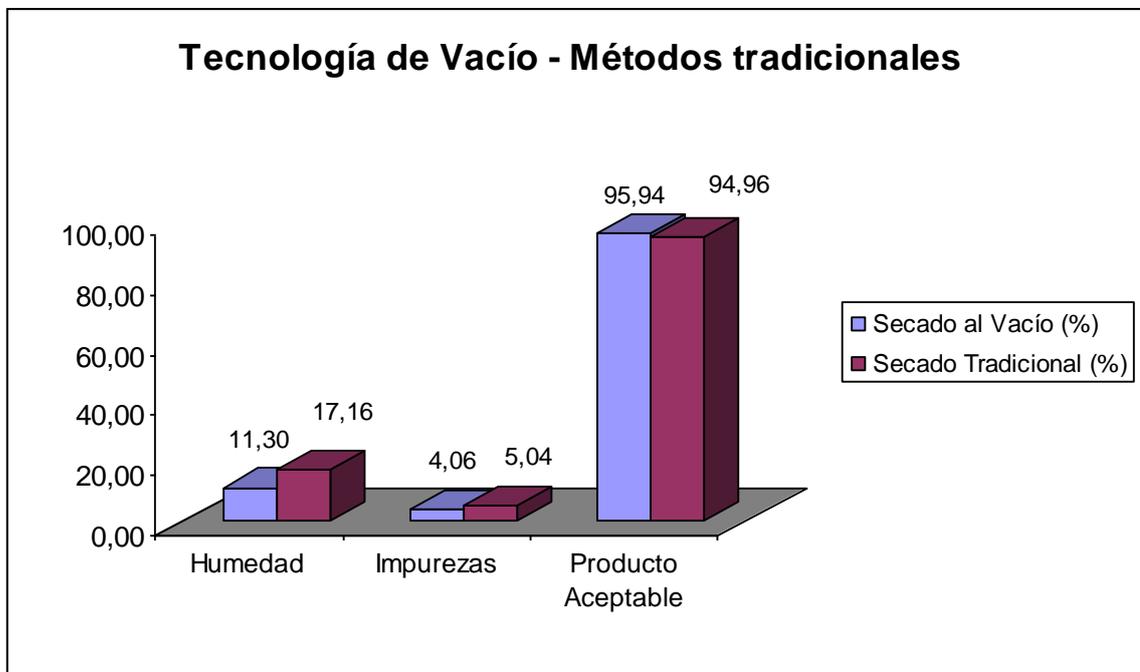


Figura 6.15 Comparación entre el método de secado al vacío vs método tradicional

De los datos obtenidos se observa que mediante la tecnología de secado al vacío se obtiene la humedad requerida en un menor intervalo de tiempo, con un proceso bajo un ambiente controlado y limpio, en comparación con los métodos tradicionales que requieren mayor tiempo y debido a que están expuestos al ambiente se ven afectados por condiciones externas tales como la presencia de impurezas, hongos e insectos, dependiendo además de condiciones ambientales que no favorecen el secado, por tanto se observa por los ensayos realizados por el método por tecnología de vacío presentan mayores ventajas frente a los métodos tradicionales en un mismo intervalo de tiempo.

6.2.2 CALCULO DE LA EFICIENCIA TOTAL DEL SISTEMA DE SECADO AL VACÍO

Una vez determinada la masa consumida de gas por ciclo de secado, se procede a calcular la eficiencia total del sistema tomando en cuenta que la energía entregada es la proporcionada por el combustible (GLP), y la energía útil es la requerida para el secado de los 5 (kg) de arroz con cáscara que fue determinado anteriormente, teniendo:

Medición	Q requerido para el secado (KJ)	Q entregado por GLP (KJ)	Eficiencia Total del Sistema (%)
1	13873.26	96129.02	14.43
2	13873.26	80107.52	17.32
Promedio			15.88

La eficiencia total del sistema es de 15.88% debido a que existen pérdidas, en el proceso de combustión, durante el calentamiento de unidades, en tuberías, en las paredes del recipiente y tubería de cobre que no está en contacto con las placas, lo que produce una baja eficiencia pero aceptable para sistemas térmicos.

El balance total de energía del sistema se encuentra representado en la **Figura 6.16** en donde se detallan las pérdidas durante el proceso y el calor utilizado para el secado.

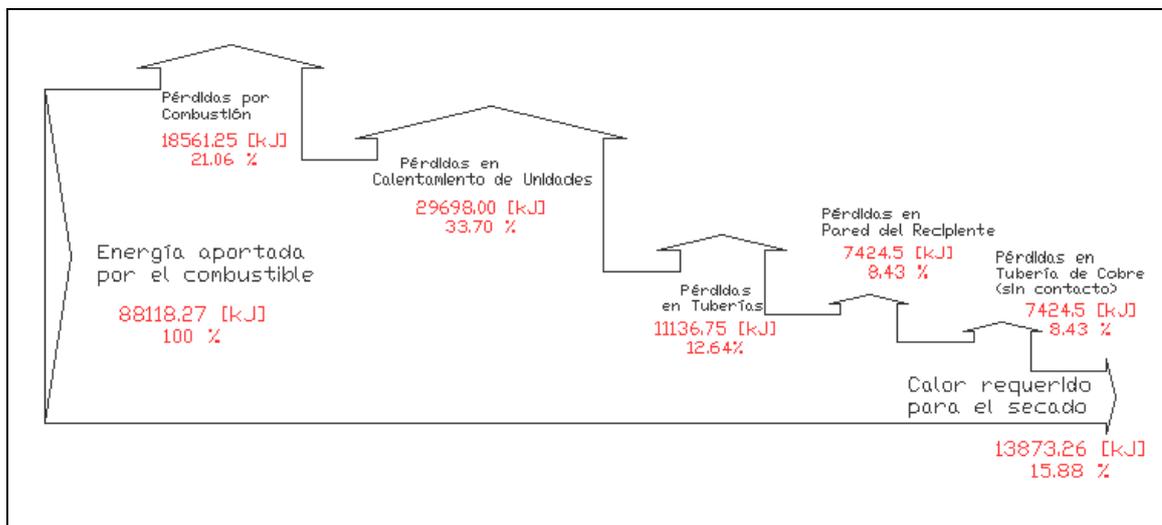


Figura 6.16 Diagrama de Sankey del balance de energía del sistema de secado

CAPITULO 8

8. EVALUACIÓN ECONÓMICA FINANCIERA

8.1 ANÁLISIS ECONÓMICO

8.1.1 INGRESOS

Para comprobar la factibilidad del proyecto es necesario obtener ingresos por la fabricación y uso de esta tecnología, razón por la cual se han establecido los siguientes medios:

- Por alquiler de la máquina
- Por venta de prototipos
- Seminarios y Cursos
- Asesoría de Proyectos
- Diseños

8.1.1.1 Ingresos por alquiler de la máquina

Este ingreso comprende el alquiler de la máquina para pruebas y ensayos de laboratorio a instituciones o personas para uso particular

Tabla 8.1 Ingresos por Alquiler de la Máquina

Año	Número de Usuarios	Número de Horas	Valor/hora	Costo
2007	6	6	12,00	432,00
2008	6	8	12,00	576,00
2009	6	8	12,00	576,00
2010	6	8	12,00	576,00
TOTAL	24	30		

8.1.1.2 Ingresos por venta de prototipos

Este ingreso comprende la venta de prototipos con características similares al anteriormente construido para pruebas y ensayos para uso particular.

Tabla 8.2 Ingresos por Venta de Prototipos

Año	CANTIDAD	Valor Unitario	Total
2007	2	3675,00	7350,00
2008	2	3858,75	7717,50
2009	1	4051,69	4051,69
2010	2	4254,27	8508,54

TOTAL	7		
--------------	----------	--	--

8.1.1.3 Ingresos por Seminarios y Cursos

Este ingreso comprende la capacitación sobre tecnologías de secado, principios de la tecnología de vacío, aplicaciones y ventajas, dirigidos a los sectores productivos.

Tabla 8.3 Ingresos por Seminarios y Cursos de Capacitación

Año	PARTICIPANTES	Valor Unitario	Total
2007	20	250,00	5000,00
2008	15	262,50	3937,50
2009	20	275,63	5512,50
2010	20	289,41	5788,13
TOTAL	75		

8.1.1.4 Asesoría de Proyectos

Este ingreso comprende la asesoría a los sectores productivos que han adquirido o están interesados en el desarrollo de la tecnología.

Tabla 8.4 Ingresos por Asesoría de Proyectos

Año	Número de Usuarios	Número de Horas	Valor/hora	Costo
2007	12	8	10,00	960,00
2008	12	8	10,00	960,00
2009	13	10	12,00	1560,00
2010	13	10	12,00	1560,00
TOTAL	50	36		

8.1.1.5 Venta de Diseños

Este ingreso comprende la venta de diseños a sectores que deseen implementar esta tecnología a gran escala.

Tabla 8.5 Ingresos por Venta de Diseños

Año	Número de Usuarios	Número de Horas	Valor/hora	Costo
2007	1	800	20,00	16000,00
2008	2	500	20,00	20000,00
2009	2	500	25,00	25000,00
2010	2	700	25,00	35000,00
TOTAL	7	2500		

8.1.2 COSTOS

8.1.2.1 Costos por Motivo de Ingresos

Estos costos son los requeridos para generar los ingresos a partir del primer año de producción

Tabla 8.6 Costos por mantenimiento de la máquina

CONCEPTO	CANTIDAD	V. HORA	N HORAS	TOTAL
Laboratorista	1	5,00	60	300,00
Insumos y Lubricantes				1000,00
TOTAL				1.300,00

Tabla 8.7 Costos por desarrollo de Seminarios y Cursos

CONCEPTO	CANTIDAD	V. HORA	N HORAS	TOTAL
Alquiler de local	2	10,00	40	800,00
Alquiler de mobiliarios y equipo	2	5,00	40	400,00
Publicidad				200,00
Número de Participantes		Costo Unitario		
MATERIAL DIDACTICO	25	5,00		125,00
TOTAL				1.525,00

Tabla 8.8 Costos por Asesoría de Proyectos

CONCEPTO	V. HORA	N HORAS	TOTAL
Honorarios profesionales	10,00	96	960,00
Viáticos	5,00	96	480,00
TOTAL			1.440,00

Tabla 8.9 Costos por Venta de Diseños

CONCEPTO	V. HORA	N HORAS	TOTAL
Honorarios profesionales	10,00	1500	15.000,00
Viáticos	5,00	450	2.250,00
Material Técnico			500,00
Utiles de Oficina			500,00
Servicios básicos			630,00
TOTAL			18.880,00

8.1.2.2 Costos Indirectos

Tabla 8.10 Mano de Obra Indirecta

Concepto	Detalle	Valor hora Honorario	Tiempo Utilizado)	Sub-Total
----------	---------	----------------------	-------------------	-----------

Director	Ingeniero de Investigación	3,00	40	120,00
Codirector	Ingeniero de Diseño de Recipientes	3,00	40	120,00
TOTAL				240,00

Tabla 8.11 Material Indirecto

Descripción	Cantidad	Costo Unitario	Total
Adquisición de software libros y revistas	1	60,00	60,00
Otros	1	50,000	50,00
Útiles de oficina	1	50,00	50,00
TOTAL			160,00

Tabla 8.12 Costo de Mantenimiento en el año de inversión

Concepto	Cantidad	Valor unit.	Total
Repuestos y suministros	1	36,00	36,00
Combustibles y lubricantes	1	36,00	36,00
Otros gastos de funcionamiento	1	200,00	200,00
TOTAL			272,00

8.1.2.3 Costos Directos

Tabla 8.13 Mano de Obra Directa

Detalle	Valor Hora	Tiempo (Horas)	Sub-Total	Manutención	Total
Luis Ricardo Estudiante FIME - ESPE	1,00	300	300,00	200,00	500,00
Pablo Gallegos Estudiante FIME - ESPE	1,00	300	300,00	200,00	500,00
Tercerizados					180,00
	2,00	600,00	600,00		1.180,00

Tabla 8.14 Quemador

Quemador			
Cant.	Elementos	C. Unitario	C. Total
1	Manguera de gas(m)	1,12	1,12
1	Válvula industrial	6,50	6,50
1	Tanque de gas (15 kg)	35,00	35,00
2	Tubo de Vapor 3/4 (m)	5,00	10,00
1	Tubo de Vapor 1 (m)	6,00	6,00
2	Abrazaderas	0,40	0,80
1	Válvula de regulación	3,80	3,80
1	Encendedor eléctrico	3,80	3,80
8	Pernos 5/16 x 1/2	0,05	0,40
8	Pernos 5/16 x 1 1/2	0,08	0,64

SUBTOTAL	68,06
-----------------	--------------

Tabla 8.15 Unidades de Calentamiento

Unidades de calentamiento			
Cant.	Elementos	C. Unitario	C. Total
1	Tol acero inoxidable t=1.2mm	12,00	12,00
2	Neplos Acero Negro 1"	3,80	7,60
1	Neplo Acero Negro 1" x 35	5,00	5,00
2	Codos Acero Negro 1"	1,20	2,40
2	Codos Galvanizado 1"	0,60	1,20
1	Lana de vidrio(aislante) (m2)	4,00	4,00
8	Pernos 3/16"	0,03	0,24
8	Arandelas 3/16"	0,02	0,16
SUBTOTAL			32,60

Tabla 8.16 Tuberías y Acoples

Tuberías y Acoples			
Cant.	Elementos del Vaporizador	C. Unitario	C. Total
3	Codos Galvanizado 1"	0,68	2,04
1	Neplo HG 3/4" x 20	1,01	1,01
2	Neplo HG 1/2 "x 20	0,74	1,48
2	Neplo Corrido HG 3/4"	0,31	0,62
2	Neplo HG 1" x 40	1,20	2,40
2	Neplo HG 1" x 20	0,96	1,92
2	Neplo 1" x 10	0,85	1,70
2	Neplo Flex 3/4"	0,60	1,20
1	Tee HG 3/4"	0,40	0,40
1	Busching HG 1 -3/4	0,40	0,40
1	Reducción 3/4 "- 1/2"	0,26	0,26
1	Reducción 1/2" - 1/4"	0,18	0,18
3	Uniones 3/4	0,70	2,10
3	Manguera 3/4 (m)	1,40	4,20
2	Universales HG 3/4"	1,11	2,22
1	Universal HG 1"	1,23	1,23
1	Válvula Bola 3/4"	3,44	3,44
2	Válvulas Bola 1/2"	2,92	5,84
6	Teflón Rojo	0,40	2,40
2	Adaptadores para acople rápido	1,40	2,80
4	Abrazaderas 7/8	0,50	2,00
SUBTOTAL			39,84

Tabla 8.17 Materia Prima Directa

Cant.	Descripción	Costo Unitario USD	Costo Total USD
1	Termómetro	65,00	65,00
1	Vacuómetro	86,00	86,00
1	Bomba de Vacío 4 (cfm)	1200,00	1200,00
1	Bomba de Agua 1/2 HP	58,00	58,00
1	Unidad de Calentamiento	32,60	32,60
1	Quemador	68,06	68,06
1	Plancha de Aluminio	40,00	40,00
1	Plancha de tol negro 3(mm)	60,00	60,00
2	Bridas(t=5mm)	7,50	15,00
1	Tubo de Cobre 1/2 " (6m)	18,00	18,00
1	Tubo de Cobre 1 " (1m)	6,00	6,00
2	Tubo cuadrado 1" (6m)	18,00	36,00
1	Tuberías y Acoples	39,84	39,84
1	Sello de Neopreno (m2)	15,00	15,00
1	Sellante "Permatex"	4,60	4,60
1	Masilla Epóxica	3,20	3,20
2	Electrodos (kg)	3,20	6,40
1	Pintura base (lt)	2,50	2,50
1	Pintura esmalte (lt)	3,50	3,50
4	Tinner (lt)	0,80	3,20
1	Aceites y lubricantes	15,00	15,00
2	Equipo de trabajo	19,50	39,00
20	Lijas	0,40	8,00
6	Cables (m)	1,20	7,20
1	Switch de Cuchilla	3,00	3,00
1	Malla metálica (m2)	2,40	2,40
TOTAL			1837,50

Tabla 8.18 Costo de Producción por máquina a partir del primer año

CONCEPTO	CANTIDAD	V. HORA	N HORAS	TOTAL
Técnico	1	4	78	312
Auxiliar	1	3	78	234
MATERIAL DIRECTO				2.021,25
TOTAL				2.567,25

8.2 FLUJO DE CAPITAL

Tabla 8.19 Costos indirectos de fabricación

AÑO	2006	2007	2008	2009
MANO DE OBRA INDIRECTA	240,00	18990,00	19939,50	20936,48
MATERIAL INDIRECTO	432,00	2200,00	2310,00	2425,50
SERVICIOS BÁSICOS	600,00	630,00	661,50	694,58
OTROS GASTOS	1253,00	1200,00	1260,00	1323,00
COSTO TOTAL	2525,00	23020,00	24171,00	25379,55

Tabla 8.20 Costos directos de fabricación

AÑO	2006	2007	2008	2009
MATERIAL DIRECTO	1.837,50	2.021,25	2.122,31	2.228,43
MANO DE OBRA DIRECTA	1.180,00	546,00	573,30	601,97
COSTO TOTAL	3.017,50	2.567,25	2.695,61	2.830,39

8.3 FLUJO DE FONDOS

DEFINICIONES

Tasa Interna de Retorno (TIR): Tasa de interés pagada sobre saldos insolutos de dinero tomado en préstamo o la tasa de interés ganada sobre el saldo no recuperado de una inversión (préstamo), de tal manera que el pago o ingreso final, lleva el saldo considerado a cero, considerando el interés. Para la rentabilidad del proyecto la tasa de retorno debe ser superior a la tasa de descuento, en el flujo de fondos anteriormente analizado el valor de TIR es de 71 % resultando mayor que el 15 % correspondiente a la tasa de descuento lo que indica que el proyecto si es rentable.

Valor Actual Neto (VAN): Valor que indica el saldo recuperado de la inversión a través del flujo de capital con los ingresos proyectados al año de inversión. En la evaluación del proyecto el VAN tiene que ser de valor positivo, en el flujo analizado se ha obtenido un VAN = 6733 USD lo que indica que el proyecto es rentable.

Relación Beneficio /Costo (B/C): Relación de los beneficios a los costos asociados con un proyecto particular. Un proyecto se considera atractivo cuando los beneficios derivados desde su implantación exceden a los costos asociados. Para el caso particular de este proyecto B/C = 2.21.

Periodo Real de Recuperación: Tiempo en el que se recupera la inversión realizada de un proyecto. El periodo real de recuperación para el proyecto es de 1.7 años

CAPITULO 9

9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

9.1 CONCLUSIONES

- El sistema de secado de arroz al vacío genera un producto con el rango de humedad requerido de 11% - 12% en un tiempo de dos horas, frente a los métodos tradicionales de secado al ambiente que demoran de 5 a 7 días para obtener el mismo grado de humedad.

- El secado con tecnología de vacío es un proceso controlado que no depende de factores ambientales externos, lo que permite su uso bajo cualquier condición externa a diferencia con los métodos tradicionales de secado.
- La característica de este tipo de tecnología es trabajar sin depender de condiciones externas, por lo que este tipo de proceso puede aplicarse en forma industrial continua con un mejor aprovechamiento del tiempo.
- El sistema de secado al vacío posee la característica intrínseca de reducir la cantidad de aire dentro del recipiente, lo que disminuye las pérdidas por convección, favoreciendo a transmisión de calor por conducción y ayuda a incrementar la eficiencia del sistema.
- Este tipo de tecnología al transferir por conducción requiere contacto entre la placa caliente y el producto por lo que se debe tener un sistema de mezcla del arroz y la superficie caliente para favorecer el secado.
- Para transferir el calor generado por la combustión se requiere de un fluido caloportador, que para este caso es el agua por alto calor específico (4,184 KJ/Kg°C) y su disponibilidad, circulando a un caudal de 2 (m³/h).
- La disminución de presión en el interior del recipiente reduce la temperatura de evaporación del agua en el grano, en consecuencia se requiere menor calor en el proceso y por tanto un ahorro de consumo de combustible.
- El desarrollo de esta tecnología requiere de personal calificado que conozca el uso de códigos, capacitación en los procesos de fabricación y equipo tecnológico apropiado lo que involucra nivel elevado de costos de fabricación.
- El manual de operación es una guía que sirve para la correcta utilización del prototipo cuyos pasos deben ser seguidos en el orden indicado para evitar daños en el sistema que complementado con un correcto seguimiento del manual de mantenimiento contribuye a preservar la vida útil de la máquina.

9.2 RECOMENDACIONES

- Los procesos vitales de deterioro del grano ocurren en forma muy lenta cuando hay poca humedad, por lo que requiere un proceso de secado previo al almacenamiento de los productos, que reduzcan las pérdidas generadas en la poscosecha.
- La implementación de esta tecnología se debería desarrollar a nivel industrial ya que al reducir considerablemente los tiempos de secado, eleva el nivel de competitividad del productor.
- Para conseguir bajo consumo de combustible es recomendable la recirculación del fluido en un sistema cerrado.
- El agua a utilizarse debe estar libre de sales y de baja dureza para evitar daños en las tuberías por corrosión y cavitación en la bomba.
- La presión de vacío debe mantenerse dentro del rango de diseño establecido (13.23 PSI) para obtener un bajo consumo de combustible, por tanto se debe tomar en cuenta la hermeticidad del recipiente durante todo el proceso.
- El recipiente a presión además de su hermeticidad debe poseer resistencia a la presión externa por lo que se ha diseñado bajo las condiciones mas extremas de presión y temperatura.
- Las condiciones de la bomba de vacío deben ser óptimas para de esta forma garantizar la hermeticidad en el proceso evitando que se encuentre arrojando aceite dentro del recipiente y por tanto contaminado el producto.

- Los elevados costos de fabricación de este tipo de sistema, requieren de una gran inversión inicial con recuperación a mediano y largo plazo, por tanto es recomendable que su implementación sea financiada a nivel de grandes industrias o asociaciones de pequeños productores para producir rentabilidad de este proyecto.
- Las impurezas presentes en el arroz cosechado dificultan el proceso de secado debido a que son higroscópicas, incrementando el nivel de humedad del producto además que son aislantes térmicos lo que impide el correcto proceso de secado, por lo que se tiene que eliminar la mayor cantidad de impurezas presentes previo al proceso de secado.
- El método de secado al vacío es una tecnología nueva en el medio, por lo que para su implementación se debe priorizar en la capacitación, que permiten obtener ingresos que sustenten el desarrollo del proyecto a mayor escala y largo plazo.