

**INGENIERÍA BÁSICA DE UN SECADOR CON TRANSPORTE NEUMÁTICO,
APLICADO A LA DESECACIÓN DE ALMIDÓN DE YUCA Y CONSTRUCCIÓN
DE UN MODELO**

ALFONSO GIOVANI BONFANTE HERNÁNDEZ

EDUARD LUIS GONZALEZ OJEDA

CORPORACIÓN UNIVERSITARIA TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

CARTAGENA D.T. Y C.

2002

**INGENIERÍA BASICA DE UN SECADOR CON TRANSPORTE NEUMÁTICO,
APLICADO A LA DESECACIÓN DE ALMIDÓN DE YUCA Y CONSTRUCCIÓN
DE UN MODELO**

ALFONSO GIOVANI BONFANTE HERNÁNDEZ

EDUARD LUIS GONZALEZ OJEDA

Tesis para optar el título de Ingeniero Mecánico

Director

VLADIMIR QUIROZ MARIANO

Ingeniero Mecánico

CORPORACIÓN UNIVERSITARIA TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

CARTAGENA D.T. Y C.

2002

Nota de aceptación

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Cartagena 15 enero de 2002

DEDICATORIA

*A mis padres, Esiquio y Ana por haberme puesto en el
camino,*

*A mis hermanos Over, Milton, Wiston y Willian por su
gran apoyo*

A mi esposa Ruth por su gran amor y fe

*A mis hijas Ruth Liseth y Ana Margarita por ser el
motivo*

*Y a nuestro padre celestial, por que sin El nada
había sido posible*

EDUARD

DEDICATORIA

A Dios por su inmensa ternura y amor , por cada una de las bendiciones recibidas durante la realización de este proyecto; y por guiar nuestros pasos en los momentos difíciles.

A mis padres Alfonso y Julia, por la confianza depositada, por su gran esfuerzo e incondicional apoyo. Por su comprensión y cariño inigualable.

A mi querida hermana, Ana Milena, por su amor y su apoyo

A mis amigos y compañeros de oración de la Parroquia San Nicolás de la Roca, en especial a los jóvenes

integrantes de los grupos de oración Horizonte

Cristiano y JONAES

ALFONSO

AGRADECIMIENTOS

No habría sido posible realizar este trabajo sin la ayuda y el consejo de muchos amigos y personas que nos ofrecieron el don de su experiencia. Expresamos nuestros más sinceros agradecimientos a:

JHON JAIRO HURTADO BERMÚDEZ, promotor del proyecto de Agroempresas Rurales – CIAT, por estimular el conocimiento y la investigación acerca de la producción y usos del almidón de yuca en Colombia, y por orientar la investigación del proyecto en el área de almidón de yuca en Colombia, producción y recomendaciones.

ADALBERTO MATUTE, Ingeniero Químico, docente de la facultad de Ingeniería Química de la Universidad de San Buenaventura; por la ayuda generosa y desinteresada, en el desarrollo de técnicas que permitieran adaptar conceptos básicos de transferencia de calor y procesos unitarios a las condiciones de operación del secador neumático.

JAVIER OLIVEROS, Laboratorista de la facultad de Química y Farmacia de la Universidad de Cartagena, por compartir su valiosa experiencia como director de laboratorio de la empresa Almidones de Colombia S.A. , ubicada en el municipio de Sampúes –Sucre.

EDINSON PAUTT SCHOTBORGHT, por hacer realidad el sueño de plasmar de una manera creativa, ingeniosa y artística la idea del modelo del secador con transporte neumático, en una maqueta la cual constituye la representación física del proyecto del secador.

CONSTANTINO SOMPOLAS, Ingeniero Mecánico Gerente de la empresa ERMIS Ltda., por brindar de manera generosa su experiencia y el buen nombre suyo y de su empresa, para servir de mediador entre los proveedores de los equipos necesarios para la selección de los elementos del secador neumático.

CONTENIDO

	Pag.
1. LA YUCA	20
1.1. GENERALIDADES	20
1.1.1. Planta y cultivo	20
1.1.2. Análisis de la raíz	25
1.1.3. Cianógenos	26
1.2. VARIEDADES	24
1.3. PRODUCCIÓN Y RENDIMIENTO	28
1.3.1 Producción de yuca en el mundo	28
1.3.2 Producción de yuca en Colombia	31
1.4. USO INDUSTRIAL DEL ALMIDÓN	31
1.4.1. Industria de alimentos	32
1.4.2. Industria del papel	33
1.4.3. Pegantes	33
1.4.4. Industria textil	34
1.4.5. Industria Farmacéutica	35
1.4.6. Otros usos	36
2. GENERALIDADES DEL ALMIDÓN	37
2.1 COMPOSICIÓN QUÍMICA	40

2.2	DESCRIPCIÓN FÍSICA DE LOS GRANOS DE ALMIDÓN	42
2.2.1.	Tamaño	45
2.2.2.	Forma	45
2.2.3.	Núcleo y estratificación	46
2.2.4.	Refracción	46
2.3	GELATINIZACIÓN	48
2.4	RETROGRADACIÓN	50
2.5.	pH	52
2.6.	INTERACCIÓN DEL ALMIDÓN CON OTROS CONSTITUYENTES	52
2.6.1.	Agua	52
2.6.2.	Azúcares y sales	52
2.6.3.	Emulsionantes y lípidos	53
2.7.	MANUFACTURA DEL ALMIDÓN DE YUCA	53
2.7.1	Lavado de raíces	55
2.7.2	Rallado de raíces	59
2.7.3	Colado o tamizado	63
2.7.4	Sedimentación del almidón	68
2.7.5	Secado del almidón	72
2.7.6	Tratamiento final del almidón	73
2.7.7	Rendimiento	74
2.7.8	Manejo de insumos	75
3.	EQUIPOS PARA LA DESECACIÓN DE SÓLIDOS	79
3.1.	CLASIFICACIÓN DE LOS SECADORES	79

3.1.1. Secadores directos	79
3.1.2. Secadores indirectos	80
3.1.3. Secadores diversos	80
3.2. SELECCIÓN DEL EQUIPO DE DESECACIÓN	81
3.2.1. Selección inicial de los secadores	81
3.2.2. Comparación inicial de los secadores	82
3.2.3. Pruebas de desecación	82
3.2.4. Selección final del secador	82
3.3. EQUIPOS COMUNES EN LA DESECACIÓN DE SÓLIDOS	86
3.4. SECADORES DE TRANSPORTE NEUMÁTICO	94
4. DISEÑO	99
4.1. PRINCIPIOS DE DESECACIÓN	99
4.1.1. Mecanismo interno de la circulación del líquido	103
4.2. PSICOMETRÍA	104
4.2.1. Propiedades del vapor de agua	105
4.3. CONSIDERACIONES DE DISEÑO	110
4.4. CALCULO DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL SECADOR	122
4.4.1. Nomenclatura	122
4.4.2. Balance de materia respecto al sólido	123
4.4.3. Balance de materia y calor en el secador	127
4.5. CALCULO DE LAS DIMENSIONES DEL DUCTO SECADOR	136
4.5.1. Periodo de precalentamiento	136
4.5.2. Periodo de calentamiento	137

4.5.3.	Periodo de evaporación	138
4.5.4.	Diferencia media de evaporación	140
4.5.5.	Dimensiones del secador	142
4.6.	CALCULO DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL QUEMADOR	146
4.6.1.	Entalpía de formación de una sustancia pura (Δh_f)	149
4.7.	CALCULO DE LAS DIMENSIONES DEL CICLÓN	159
4.7.1.	Caída de presión en un sistema particular de ciclón	160
4.8.	CAÍDA DE PRESIÓN EN EL SISTEMA	166
4.8.1.	Para acelerar el gas a la velocidad de transporte	166
4.8.2.	Para acelerar las partículas sólidas	166
4.8.3.	Para la fricción entre el gas y la pared de la tubería	166
4.8.4.	Para la fricción combinada entre las partículas y la pared de la tubería	167
4.8.5.	Para el soporte de la columna de gas	167
4.8.6.	Para el soporte de los sólidos	168
4.8.7.	Caída total de presión	168
4.8.8.	Base de cálculo de las variables utilizadas en el cálculo de la caída de presión del sistema	168
5.	ESTUDIO DETALLADO DE LOS ELEMENTOS QUE CONFORMAN EL TRANSPORTADOR NEUMÁTICO	176
5.1.	VENTILADORES	176
5.1.1.	Parámetros para la selección de un ventilador	178
5.1.2.	Parámetros para la selección de un ventilador	181
5.1.3.	Designaciones y configuraciones estándar	184
5.2.	SEPARADORES DE FASE CENTRÍFUGOS	190

5.2.1.	Selección del equipo de recolección de polvos	190
5.2.2.	Ciclones	191
5.2.3.	Funcionamiento	192
5.2.4.	Factores de diseño de un ciclón	192
5.2.5.	Eficiencia de recolección	196
5.3.	MOLINOS DE JAULA	199
5.3.1.	Molinos de jaula – Single Row	201
5.3.2.	Molinos de jaula – Multi Row	205
5.3.3.	Selección del molino de jaula	216
5.4.	Ducto de transporte	216
5.4.1.	Normas para tubería	216
5.4.2.	Designación de los códigos o reglamentos	217
5.4.3.	Composición química	218
5.4.4.	Dimensiones, pesos y presión interna	218
6.	EVALUACIÓN ECONÓMICA	221
6.1.	ANÁLISIS ECONÓMICO	223
6.1.1.	Determinación de los costos de producción	223
6.1.2.	Determinación de la inversión total, fija y diferida	227
6.1.3.	Depreciación y amortización	230
6.1.4.	Información de los costos variables y los costos fijos de la inversión	231
6.1.5.	Financiamiento de la empresa	231
6.1.6.	Presupuesto de ingresos por ventas	234
6.1.7.	Estado de resultados	235

6.2.	CÁLCULO DE LA TIR CON FINANCIAMIENTO	235
7.	CONCLUSIONES	239
8.	RECOMENDACIONES	243
	BIBLIOGRAFÍA	245
	ANEXOS	247

LISTA DE TABLAS

	Pag.
Tabla 1. Taxonomía de la planta de yuca	20
Tabla 2. Localización de almidón para diferentes tipos de plantas	39
Tabla 3. Dimensiones de un ciclón modelo Quad Duclon	164
Tabla 4. Tablas de las dimensiones, pesos y presiones admisibles de tubería de acero inoxidable	219
Tabla5. Capacidad total requerida	224
Tabla 6. Costos de la mano de obra directa	226
Tabla 7. Costos de mantenimiento	226
Tabla 8. Costos de producción	229
Tabla 9. Costos de maquinaria y equipos	230
Tabla 10. Presupuesto de la inversión fija del proyecto.	231
Tabla 11. Depreciación y amortización de la inversión fija	232
Tabla 12. Costos variables y costos fijos de la inversión	233
Tabla 13. Tabla de pago del préstamo refaccionario	231
Tabla 14. Presupuesto de ingreso por ventas	234
Tabla 15. Estado de resultados	236

LISTA DE FIGURAS

	Pag.
Figura 1. Planta de yuca (<i>Manihot esculenta crantz</i>)	23
Figura 2. Raíces de la yuca ya cosechadas.	24
Figura 3. Corte transversal de la raíz de yuca	28
Figura 4. Producción de yuca (millones de toneladas) en los principales países productores del mundo (FAO, 1997).	27
Figura 5. Distribución de la producción de yuca destinada al uso local (85%) en el mundo (FAO, 1997)	28
Figura 6. Descripción del proceso de fotosíntesis.	39
Figura 7. Configuración molecular tridimensional	43
Figura 8 Gránulos de diversas especies de almidón	46
Figura 9. Proceso de gelatinización en un granulo de almidón	52
Figura 10. Diagrama del proceso general de extracción de almidón nativo de yuca.	58
Figura 11. Lavadora/peladora de raíces de yuca, de cuerpo cilíndrico y semieje, para carga lateral.	48
Figura 12. Lavadora / peladora de raíces de yuca. De cuerpo cilíndrico y eje central, para carga frontal	50
Figura 13. . Lavadora / peladora de raíces de yuca. De cuerpo cilíndrico y eje central, de acción semicontinua	50
Figura 14. Rallador tradicional de raíces de yuca en que la superficie externa del cilindro es una lámina perforada .	52
Figura 15. Colado manual de la masa de yuca rallada.	67
Figura 16. Colado continuo de la masa rallada, empleando un tornillo sin fin	68

Figura 17. Coladora mecánica discontinua de cilindro y semi eje para colocar o tamizar la masa de yuca rallada	56
Figura 18. Coladora mecánica de cilindro soportada sobre cuatro rodamientos	70
Figura 19. Diagrama de flujo del proceso de obtención de almidón modificado de yuca y balance de rendimiento de almidón	58
Figura 20. Almidón sedimentado en tanques (el operario “desmancha” una capa).	72
Figura 21. Sistema de siete canales para la sedimentación del almidón a partir de la lechada de yuca	61
Figura 22. Distribución esquemática de las operaciones de producción de almidón de yuca en una rallandería.	63
Figura 23. Clasificación de los secadores	86
Figura 23. Secador de parrillas al vacío.	88
Figura 24. Secador de turbo bandejas	90
Figura 25. Secadores continuos de túnel	92
Figura 26. Configuración de los componentes de un secador rotatorio contracorriente	93
Figura 27. Secador de transportador continuo	94
Figura 28. Horno de hogar rotatorio	95
Figura 29. Secador de transportador neumático de una sola etapa (<i>Raymond Division, Combustion Engineering Inc</i>)	83
Figura 30. Representación esquemática de un secadero adiabático continuo con funcionamiento a contracorriente.	96
Figura 31. Esquema del secador de transporte neumático.	128
Figura 32. Esquema de operación del secador neumático	136
Figura 33. Presentación esquemática de un quemador con entrada de aire secundario	159
Figura 34. Esquema del análisis de las pérdidas por fricción en un ciclón.	164
Figura 35. Configuración de cuatro ciclones en paralelo-	165

Figura 36. Proporciones de un ciclón separador y sistema de ductos	167
Figura 37. Coeficiente de resistencia para esferas, discos y cilindros.	177
Figura 38. Diseños de alabes.	181
Figura 39. Rendimiento de un típico ventilador centrífugo	182
Figura 40. Designaciones estándar para rotación y descarga	189
Figura 41. Diseños estándar de accionamiento	190
Figura 42. Posiciones estándar de la caja de admisión	191
Figura 43. Posiciones estándar del motor	191
Figura 44 . Separador por choque de boquilla invertida	193
Figura 45. Ciclón con entrada helicoidal	197
Figura 46.Ciclón con entrada en voluta	197
Figura 47. Curva de eficiencia de separación de ciclones	199
Figura 48. Molino de jaula single-row típico. Muestra el flujo de materiales durante la trituración	163
Figura 49 . Etapas en la construcción de un molino de jaula single-row	208
Figura 52. Despiece del molino y su montaje.	214
Figura 53. Secciones principales de un molino.	215
Figura 54. Especificaciones de las dimensiones del molino de jaula Modelo Y (Mezclador y Triturador)	174

LISTA DE CUADROS

	Pag.
Cuadro 1. Características de algunos almidones usados en la industria alimentaria.	42
Cuadro 2. Propiedades fisicoquímicas del almidón de yuca	78
Cuadro 3. Velocidad del aire que se requiere para transportar sólidos de varias densidades de masa	114
Cuadro 4. Valores de la entalpía de los productos a la temperatura especificada	156
Cuadro 5. Sección de entrada a un ciclones esquemático	160
Cuadro 6. Dimensiones de la admisión y la descarga del ciclón preliminar	161
Cuadro 7. Dimensiones generales de los diferentes molinos de jaula modelo Y	214
Cuadro 8. Composición química de ductos metálicos	218

LISTA DE ANEXOS

	Pag.
Anexo A. Clasificación de los secadores, basados en los materiales	203
Anexo B. Propiedades termodinámicas del agua, aire y vapor de agua	207
Anexo C. Condiciones climatológicas del municipio de Sahún	213
Anexo D. Carta psicométrica	216
Anexo E. Valores de la entalpía de formación de la función de Gibbs de formación	217
Anexo F. Entalpía, energía interna y entropía absoluta del nitrógeno diatómico	218
Anexo G. Entalpía, energía interna y entropía absoluta del oxígeno diatómico	220
Anexo H. Entalpía, energía interna y entropía absoluta del dióxido de carbono	222
Anexo I. Entalpía, energía interna y entropía absoluta del agua	224
Anexo J. Datos de capacidad térmica específica de gas ideal para gases	226
Anexo K. Factor de fricción de fanning	228
Anexo L. Equivalencias de ductos circulares a rectangulares para igual fricción y capacidad	229
Anexo M. Ventiladores tipo turbina tipo T – Modelo 39T100-150	232

1. LA YUCA

1.1. GENERALIDADES

La yuca (*Manihot esculenta crantz*), (ver tabla 1) es una especie de raíces amiláceas que se cultiva en los trópicos y subtropicos. A pesar de que es uno de los cultivos alimenticios más importantes de los países tropicales, fuera de ellos es muy poco conocida.

Tabla 1. Taxonomía de la planta de yuca

Nombre Científico	Manihot esculenta crantz
Nombre común	Mandioca
Reino	Vegetal
Clase	Angiospermae
Sub – clase	Dicotiledónea
Orden	Euphorbiae
Familia	Euphorbiaceae
Género	Manihot
Especie	esculenta crantz

1.1.1. Planta y cultivo. La planta de yuca tiene un tamaño y forma variables de acuerdo al tipo de ramificación. En la mayoría de las plantas propagadas vegetativamente, el tronco

se divide a cierta altura en dos o tres ramas, las que a su vez se dividen en otras tantas, dando a la copa forma redondeada. Ver figura 1



Figura 1. Planta de yuca (*Manihot esculenta* Crantz)

La yuca es originaria de América tropical. Antes de 1600, los exploradores portugueses la llevaron a África y Asia. La yuca se siembra hoy en 92 países donde alimenta a más de 500 millones de personas.

Hay actualmente más de 5000 variedades de yuca y cada una tiene características peculiares. Sus flores (masculina y femenina) son pequeñas y la polinización cruzada es frecuente. El fruto es deshiscente y las semillas pequeñas y ovaladas. La raíz es cónica y tiene una corteza externa y otra interna (de color blanco y rosado). Los tallos maduros se cortan en estacas de 7 a 30cm de longitud, con las cuales se propaga la planta. Ver figura 2.

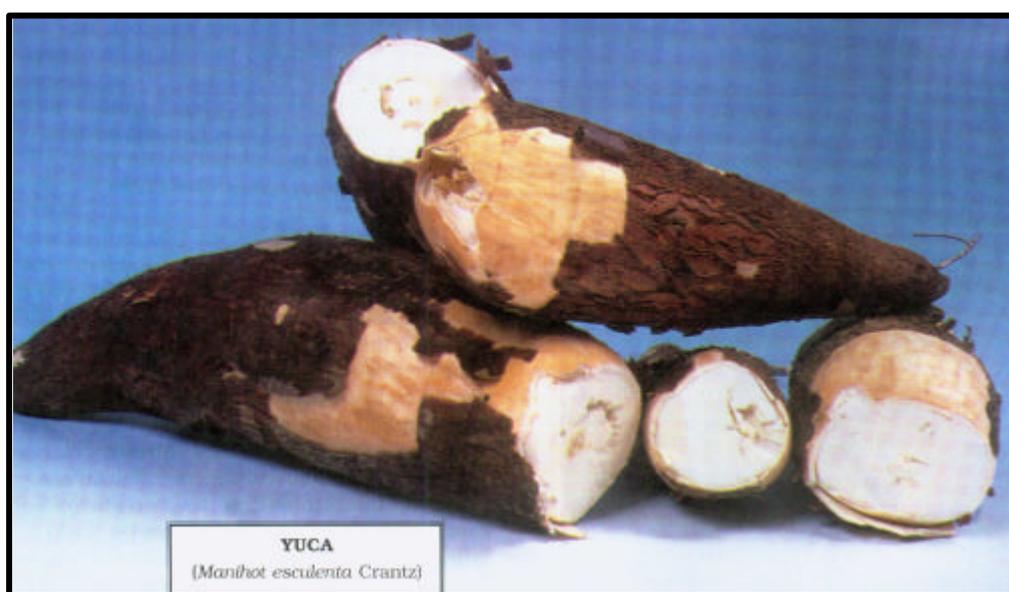


Figura 2. Raíces de la yuca ya cosechadas.

En condiciones experimentales y en monocultivo, la yuca rinde hasta 90t/ha de raíces (25 a 30 t/ha de materia seca); sin embargo, el rendimiento promedio, en condiciones reales (suelos marginales, climas severos y asociación con otros cultivos) es de 9.8 t/ha en el

mundo (12.4 t/ha en América Latina). Con una tonelada de yuca fresca se puede obtener 280 kg de harina o 230 kg de almidón o 350 kg de trozos secos o 170 litros de alcohol.*

Recientemente técnicos del Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) desarrollo un producto clonado de yuca, y que fue sembrado en una finca del municipio de Ciénaga de Oro, Córdoba. Esta variedad de yuca colombiana impuso una marca mundial en rendimiento, al producir 84 ton por hectárea , frente a las doce toneladas en promedio producen las mejores variedades del cultivo.

La cosecha, que muchos califican de asombrosa tuvo lugar recientemente en la finca Lucytonia, situada en la vereda Los Copeles, municipio de Ciénaga de Oro. Según el propietario de la finca, una sola yuca pesó 40 kilos. El clon fue sembrado en un terreno de 9.5 hectáreas y fue fertilizado con bovinaza. La cosecha arrojó un total de 799. 000 kilos que fue utilizada para extraer almidón.

Según los técnicos que siguieron de cerca el comportamiento del cultivo, este no perdió el follaje durante la época de verano, lo que ayudo a que la raíces crecieran y engrosaran constantemente y el contenido de almidón se mantuviera estable.

¹ Sección Agro – periódico El Universal
19 de agosto 2001

Aunque la yuca es un cultivo resistente, puede sufrir tres enfermedades importantes:

1. El añublo bacteriano (en hojas y tallos)
2. Las pudriciones de la raíz
3. El virus del mosaico africano (en África solamente).
4. Varios insectos chupadores (ácaro verde, piojo harinoso, mosca blanca)
5. Algunos fitófagos (gusano cachón) atacan las hojas; u chinche y un piojo subterráneo dañan a veces las raíces.

*Freddy Alarcón y Dominique Dufour. Almidón Agrío de Yuca en Colombia, Tomo 1. CIAT No. 268, pag 3

La yuca tolera la sequía (sin reducir la producción) porque posee tres características particulares:

1. Los estomas se cierran cuando el aire esta seco.
2. Las raíces extraen agua del suelo profundo (hasta 2.5m).
3. Sistema fotosintético fija el carbono atmosférico aun disponiendo de poco agua (en estrés hídrico prolongado).

Estos cultivos sobreviven en suelos escasos en fósforo por que establece asociaciones (micorriza) con hongos que suministran ese elemento; también se desarrolla en suelos ácidos (con aluminio).

En suelos fértiles y sueltos se obtienen mejores producciones, aunque también le son apropiados los suelos francos o franco arcillosos. Pueden ser suelos ácidos, ya que a un pH de 4,5 tiene una buena tuberización. La yuca no tolera un suelo inundado. Las raíces pueden cosecharse a los siete meses de plantado el cultivo y pueden permanecer en el suelo hasta 3 años. Una vez cosechadas se deterioran en 3 ó 4 días; por tanto, deben consumirse o procesarse sin demora.

El régimen local de lluvias debe ser al menos de unos 1300 mm anuales; de lo contrario habrá que aplicar riego. También debe haber un buen drenaje pues el exceso de humedad provoca pudriciones.

El periodo vegetativo es de siete a diez meses bajo temperaturas de 25 a 30°C y de 18 meses a temperaturas de 18°C. Una buena producción es de 30 a 50 toneladas por hectárea.

1.1.2. Análisis de la raíz. En el corte transversal de la raíz adulta de yuca se aprecian tres tejidos bien definidos: el periderma (casquilla), el parénquima cortical (corteza) y el parénquima interior. Ver figura 3.

1. El 80% del peso fresco de la raíz, aproximadamente, corresponde al *parénquima* o pulpa, que es el tejido en que la planta almacena el almidón.
2. El contenido de materia seca de la raíz de yuca fluctúa entre el 30% y el 40%.
3. La materia del parénquima esta constituida, en su mayor parte (90% a 95%), por la fracción no nitrogenada, es decir, por carbohidratos (almidón y azúcares)
4. El resto de esta materia seca corresponde a fibra (1% a 2%), grasas (0.5% a 1.0%), cenizas o minerales (1.5% a 2.5%) y proteína (2.0%).
5. El almidón representa, la mayor parte de los carbohidratos (96%) y es, por tanto, el principal componente de la materia seca de la raíz.

El contenido de almidón de las raíces de yuca varía de acuerdo con la edad del cultivo, con el suelo, el clima y la variedad. Por este motivo, para obtener los mayores contenidos de almidón se deben tener en cuenta los siguientes aspectos:

1. Sembrar en climas cálidos.
2. Utilizar suelos sueltos, profundos, de buena fertilidad y bien drenados.
3. Emplear variedades seleccionadas por su alta producción de almidón.

4. Cosechar oportunamente.

1.1.3. Cianógenos. La planta de yuca contiene en sus diferentes partes un glucósido cianogénico llamado linamarina, el cual produce ácido cianhídrico (HCN) por efecto de una enzima hidrolítica llamada linamarasa. Hay casos de yucas con contenido muy bajo de HCN y otras con contenido excesivamente alto.

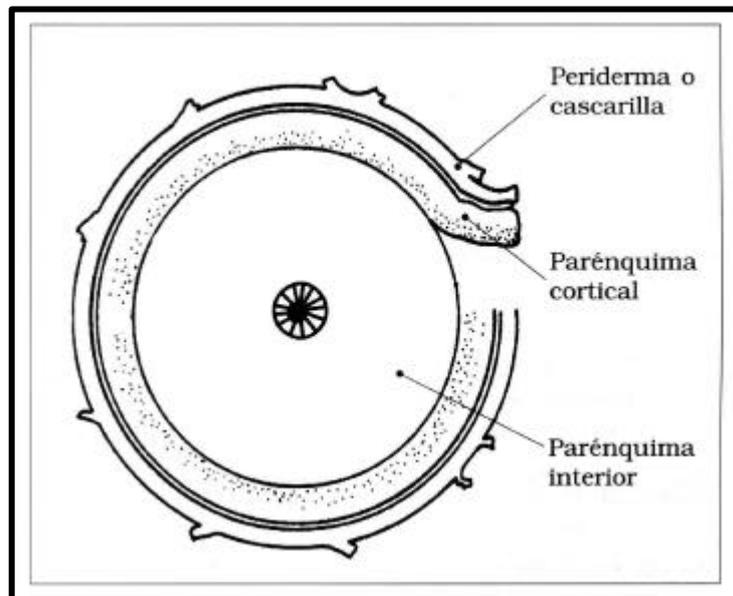


Figura 3. Corte transversal de la raíz de yuca

La mayor o menor cantidad de principios venenosos en la yuca influye en su sabor y determina la clasificación de las variedades de yuca en dulces y amargas. Comúnmente, el HCN en yucas dulces está entre 50 y 75 miligramos por kilogramos de peso fresco y en las amargas está entre 50 y 200 mg/kg.

Tanto el contenido de ácido cianhídrico como el sabor de la yuca cambian inclusive en las variedades dulces, de acuerdo con el clima, el suelo y la altitud en donde se cultive.

La corteza de la raíz contiene cianógenos en mayor concentración. Se encuentra también, aunque en menor cantidad, en las hojas y en los otros órganos de la planta.

El trabajo de procesar las raíces de una variedad 'amarga' es muy arduo. No obstante, hay agricultores que prefieren plantar estas variedades por dos razones: los cianógenos ayudan, al parecer, a proteger las plantas contra las plagas (actuales y potenciales), y los productos alimenticios elaborados con el almidón de estas variedades tienen mejor textura.

En yucas para consumo directo, al ácido cianhídrico se elimina partiéndolas en trozos y poniéndolas a cocinar de tal manera que el aumento de la temperatura sea gradual. En la obtención del almidón, el ácido cianhídrico desaparece en los procesos de lavado y secado.

Las yucas de variedades amargas no son aptas para consumo directo pero tiene utilización industrial.

1.2. VARIEDADES

Cada variedad de yuca tiene un comportamiento diferente y su tiempo óptimo de cosecha no es igual al de otras variedades. Aunque estas características dependen de dos

condiciones inherentes al sitio en que se cultiva la yuca, clima y altitud, también dependen de los caracteres genéticos de la variedad y del manejo que ésta reciba.

Cuando pasa el tiempo óptimo de cosecha de la yuca, el contenido de agua y de fibra aumentan y el porcentaje de almidón disminuye notablemente. Por consiguiente, en el proceso de obtención de este almidón se produce gran cantidad de “mancha”, un subproducto que contiene un almidón de mala calidad.

Se han desarrollado variedades de yuca resistentes a plagas y enfermedades, que se adaptan a diferentes condiciones de clima y suelo. Estas variedades dan alto rendimiento y tienen alto contenido de almidón. Muchas de ellas requieren, además, poco tiempo para llegar a la cosecha.

Cuando no se emplean prácticas de cultivo adecuadas, el rendimiento de la variedad descende, las enfermedades que la atacan aumentan, y el suelo pierde sus minerales y nutrientes.

1.3. PRODUCCIÓN Y RENDIMIENTO

1.3.1. Producción de yuca en el mundo. El cultivo de la yuca ha sido una actividad tradicional de gran importancia para la población rural de muchos países del mundo.

En los países que están en vía de desarrollo, especialmente, la yuca es uno de los componentes principales de la dieta alimentaria de sus habitantes, quienes alimentan también con ella a sus animales y la venden al mercado.

La producción mundial de yuca en 1997 llegó a más de 166 millones de toneladas métricas anuales (se producían 70 millones en 1960), de las cuales 51.7% (85.9 millones) se cosecho en África, 28.7% (47.7 millones) en Asia y el 19.4% restante (32.3 millones) en América Latina y el Caribe.

Los principales países productores de yuca son Nigeria, Brasil, Zaire, Tailandia e Indonesia; su producción de raíces frescas aparece en la figura 4. (véase figura 3) El mayor consumo anual por persona está en África (más de 90 Kg.) y Zaire es el país que más consume yuca (391 kg por persona al año, que equivales a 1123 calorías por día. El consumo mundial es de unos 18 Kg. por persona al año.

De la producción mundial (véase figura 5), cerca del 85% se consume en el lugar en que se produce; de este porcentaje , 60% se destina para la alimentación humana, cerca del 33% a la alimentación animal y el 7% restante a la producción de almidón y a las biotransformaciones del producto. El 15% restante (unos 30 millones de toneladas) se exporta cada año a Europa y a Japón como trocitos o gránulos y como almidón; de esta exportación, 75% corresponde a Tailandia y el resto a Indonesia y China. En la Unión Europea se incorporan anualmente a las raciones de los animales 5 millones de toneladas de gránulos.

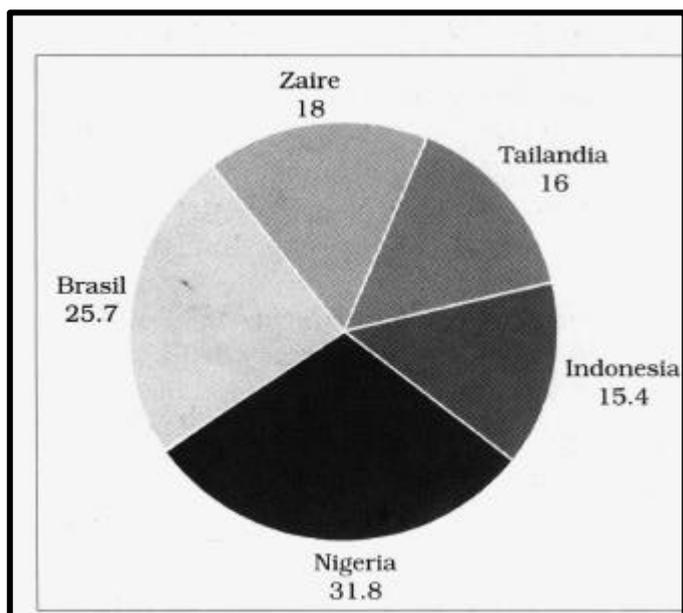


Figura 4. Producción de raíces de yuca (millones de toneladas) en los principales países productores del mundo (FAO, 1997).*

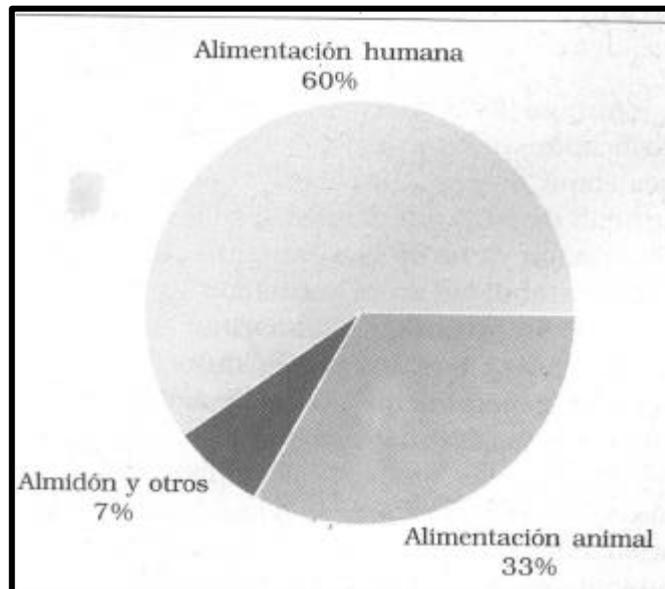


Figura 5. Distribución de la producción de yuca destinada al uso local (85%) en el mundo (FAO, 1997).

* FAO: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Italia

1.3.2. Producción de yuca en Colombia. La producción de yuca en Colombia ascendió, en 1997, a 1.9 millones de toneladas métricas, que corresponde al puesto número 16 en el mundo; el rendimiento medio es de 9.95 ton/ha, según los datos del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural del país

La principal zona productora de yuca en Colombia es la Costa Atlántica; una cantidad considerable de este producto sale también de los Llanos Orientales.

Por la estacionalidad de las lluvias, gran parte de la producción anual se concentra en ciertas épocas del año. Esta situación ocasiona a la agroindustria escasez de materia prima en unos meses del año y abundancia en otros, pérdidas por daño de las raíces frescas que se almacenan durante largo tiempo en épocas de oferta excesiva , y oscilaciones en los precios de la materia prima y del almidón.

1.4. USO INDUSTRIAL DEL ALMIDÓN DE YUCA

En el mundo se producen unos 33 millones de toneladas al año de almidón con fines industriales, de esa cantidad, solo 3.8 millones (11.4%) provienen de la yuca. El resto es almidón de maíz (21.2 millones), de papa (1.96 millones), de trigo (2.01 millones), de arroz (0.05 millones) y de batata (4.17 millones) (Ostertag, 1996)

1.4.1. Industria de alimentos. El almidón natural (llamado también nativo, dulce o industrial) se usa, solo o mezclado, en la elaboración de macarrones y de diversas harinas; con éstas se preparan pudines, pasteles, galletas, obleas, bizcochos, almojábanas, cremas, helados, sopas, ensaladas, embutidos y otros productos alimenticios. Con el almidón fermentado (agrio) se elaboran también productos alimenticios tradicionales en Colombia, como el pandebono y el pan de yuca.

El almidón nativo puede modificarse por medios físicos y se convierte en almidón pregelatinizado (almidón PG). Este almidón tiene la propiedad de que se dispersa en agua sin necesidad de someterlo a cocción.

Se usa como aditivo para espesar, estabilizar o recubrir tortas de frutas, mezclas secas, pudines, crema de leche. La adición del almidón PG mejora la textura y la apariencia de estos productos y de otros similares.

El almidón nativo puede modificarse también por medios químicos. El producto resultante se utiliza en la industria alimenticia como espesante de salsas blancas, y para estabilizar y emulsificar aderezos para ensaladas, gelatinas nutritivas, postres instantáneos, helados, pudines y alimentos para bebé. Según la modificación que se haga, el almidón modificado se usa en la industria del papel, de los adhesivos y otras (Balagopalan et al., 1998).

1.4.2. Industria del papel. El almidón nativo usado en la industria papelera se denomina almidón no modificado (almidón – NM). El tratamiento que recibe este producto comprende tres operaciones : el refinado (o tamizado), la purificación (operación estrictamente industrial) y el secado.

1.4.2.1. Papel y cartón. La elaboración del papel y del cartón consta de varias etapas, y en una de ellas (o en más de una) se adiciona almidón NM al producto final para darles ciertas propiedades y diferente calidad.

a) La industria del papel exige tres características básicas en el almidón NM de yuca: blancura, bajo contenido de fibra y pocas impurezas. Puede tener el almidón otras características físicas o químicas, las cuales afectan el proceso de elaboración del papel o la formación de la pasta que le da origen.

b) El almidón NM ayuda a unir las fibras de celulosa del papel y forma una capa superficial que reduce la pelusa y aumenta la consistencia, la solidez y la durabilidad d las hojas de papel. Esta capa delgada da también mayor resistencia mecánica al cartón.

c) El almidón NM se emplea además como adhesivo en el laminado de ciertos papeles, de cajas corrugadas, de papel de colgadura (para empapelar), de tubos de cartón y de otros artículos. También se emplea en el reciclaje de papel y del cartón.

1.4.3. Pegantes: El almidón NM es materia prima de las bases pegantes con que se elaboran ya sea productos adhesivos o colas baratas.

- a) Estos pegantes se utilizan para fabricar materiales de embalaje, etiquetas, papel de envoltura y cinta pegante de humedecer, productos cuyo uso los hace desechables.
- b) Las bases pegantes son muy útiles para las empacadoras y etiquetadoras de alta velocidad, por dos razones: costo relativamente bajo y gran velocidad de adhesión.

1.4.3.1. Descomposición orgánica: El almidón NM empleado en la industria papelera dura 3 ó 4 días sin descomponerse, al cabo de los cuales es fermentado por diversos microorganismos.

Esta fermentación produce gases (cuyo mal olor no se percibe inicialmente) y desnaturaliza el almidón NM alterando sus propiedades, a saber: Pierde el 25% de su capacidad de engomar, se reduce su viscosidad y cambia su acidez (pH).

El almidón NM deben agregarse, por tanto, sustancias que impidan el crecimiento de bacterias productoras de ácido láctico, de bacterias coliformes y de hongos (géneros *Penicillium* y *Aspergillus* y levaduras).

1.4.4. Industria Textil. El almidón NM es el integrante más abundante y barato y, por ello, el más importante de las diferentes colas textiles.

1.4.4.1. Engomado. El almidón NM de yuca se prefiere -casi en forma exclusiva- en la industria textil, por dos razones: primera, sólo con él pueden tratarse tejidos muy blancos;

segunda, se degrada menos que el almidón proveniente de otras fuentes. Un tejido puede engomarse de manera temporal o permanente.

a) El engomado temporal se aplica a la urdimbre justo antes de que esta se convierta en tejido, para que las hebras (o hilazas) sean más resistentes, flexibles, suaves y lisas. El agente almidonante se deposita como una película sobre las hilazas de la urdimbre y las recubre totalmente.

b) Evita el deshilachado, el enredo, el moteado y la rotura de las hebras, efectos que perturbarían seriamente la elaboración del tejido.

c) El engomado permanente se emplea en el proceso de acabado del tejido, y es relativamente estable, es decir, se mantiene hasta que la tela llega, por lo menos, a manos del consumidor.

d) Impregnando el tejido, este engomado mejora la textura de la tela, aumenta el brillo superficial de ésta, le da “cuerpo” y solidez para facilitar su manipulación, eleva el peso y la calidad del estampado y aumenta, en general, la apariencia y la sensación textil de buena calidad de la tela.

1.4.5. Industria Farmacéutica. El almidón PG se emplea en farmacia para diluir, aglutinar, lubricar o desintegrar diversos productos sólidos. Este almidón actúa también como absorbente, da viscosidad y sirve de vehículo a sustancias pastosas, líquidas o semisólidas en la elaboración de cremas y lociones de uso dermatológico.

Se emplea para fabricar polvos faciales finos, polvos compactos y polvos nutritivos y como soporte en la fabricación de obleas.

1.4.6. Otros usos. El almidón NM de yuca se usa en la industria química para obtener alcoholes, glucosa y acetona; para fabricar explosivos, colorantes, pilas secas e impresiones dentales; y en la coagulación del caucho.

El almidón NM se usa en minería como floculante y como componentes de las soluciones empleadas en la perforación de pozos de petróleo.

2. GENERALIDADES DEL ALMIDÓN

El almidón es una forma de los llamados polisacáridos. Macromoléculas formadas por miles de pequeñas moléculas de azúcar.

Los carbohidratos son producidos por las plantas verdes, en presencia de la luz del sol. El agua es absorbida a través de las raíces de las plantas (A), el dióxido de carbono a través de las hojas de las plantas (B). La energía solar (C) genera una reacción, con el cual se produce “*glucosa*” en las hojas de las plantas y el oxígeno que sale de ellas (D). Este proceso se llama “*fotosíntesis*”. Véase figura 6.

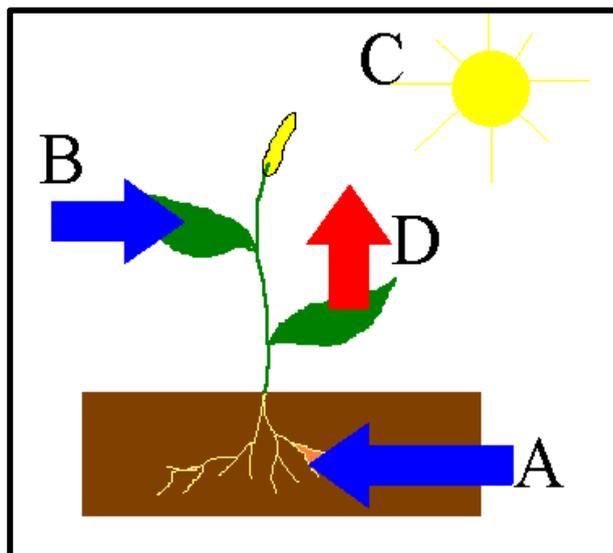


Figura 6. Descripción del proceso de fotosíntesis.

Las plantas pueden convertir esta glucosa a otros carbohidratos, tales como los azúcares, almidón y celulosa. Otros azúcares como fructosa, maltosa y sacarosa.

Los carbohidratos son formados por la combinación de los elementos carbón, hidrógeno y oxígeno. Ellos son generalmente clasificados como azúcares, almidones y celulosa.

El almidón es usado como energía de almacenamiento para el desarrollo de la planta (semillas, raíces, tubérculos), mientras que la celulosa es usada para la estructura de la planta (fibras y paredes celulares).

El almidón en los vegetales se encuentra cumpliendo diferentes funciones, según el uso en la planta se encuentra clasificado de esta manera:

Almidón primario (de asimilación, autóctono): Se encuentra en granos de clorofila en granitos pequeños, redondos o fusiformes, y es el primer producto perceptible de la conversión del ácido carbónico en sustancia orgánica carbonada ($6\text{CO} + 5\text{H}_2\text{O} = \text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5 + 12\text{O}$). Es la materia prima del que proceden el almidón de reserva y transitorio.

Para que se forme en el grano de clorofila, son necesarias la acción de la luz y la potasa (Nobbe). La última procede del suelo, y es absorbida por la planta en forma de sales. El almidón disuelto emigra por las vías amiláceas a las regiones a donde han de consumirse, es decir, a los puntos de desarrollo precoz (tejidos de formación). Si no se consume allí todo

el almidón suministrado; se deposita provisionalmente en forma de granos, constituyéndose lo que se ha llamado almidón transitorio.

Almidón Transitorio: El que se ve en algunos frutos antes de la madurez (olivas, bayas, higos, etc) y semillas que más tarde desaparece.

Almidón de reserva: El almidón se encuentra siempre en forma de granos. Los granos son muy pequeños en el almidón primario y en el transitorio, y a veces tampoco más grande en el de reserva (pimiento, cardamomo). Pero ordinariamente estos últimos alcanzan tamaño muy considerable.

Tabla 2. Localización de almidón para diferentes tipos de plantas

<u>Frutos</u>	Bananas
<u>Semillas</u>	
✓ Endospermo	Cereales
✓ Cotiledones	Leguminosas
<u>Rizomas</u>	Genero Maranta
<u>Tubérculos</u>	Patatas
<u>Raíces</u>	Tapioca
<u>Tronco</u>	Sagú

Este polisacárido ha sido parte fundamental de la dieta del hombre desde los tiempos prehistóricos, además de que se le ha dado un gran número de usos industriales. Se encuentra en cereales, los tubérculos y en algunas frutas como polisacáridos de reserva energética y su concentración varía con el estado de madurez.

2.1. COMPOSICIÓN QUÍMICA

Químicamente es una mezcla de dos polisacáridos muy similares, es la amilosa y la amilopectina; el primero es el producto de la condensación de D-glucopiranosas, por medio de enlaces glucosídicos α (1,4) que establece largas cadenas lineales con 200 – 2500 unidades y pesos moleculares hasta de un millón; es decir, la amilosa es una α -D-(1,4)-glucana, cuya unidad repetitiva es la α -maltosa. Tiene la facilidad de adquirir una conformación tridimensional helicoidal Fig. 12, en la que cada vuelta de la hélice consta de seis moléculas de glucosa. Por su parte la amilopectina se diferencia de la amilosa en que contiene ramificaciones que le dan una forma molecular similar a la de un árbol; las ramas están unidas al tronco central (semejante a la amilosa) por enlaces α -D-(1,6), localizadas cada 15-25 unidades lineales de glucosa. (Ver figura 7). Su peso molecular es muy alto ya que algunas fracciones llegan a alcanzar hasta 200 millones de daltones.

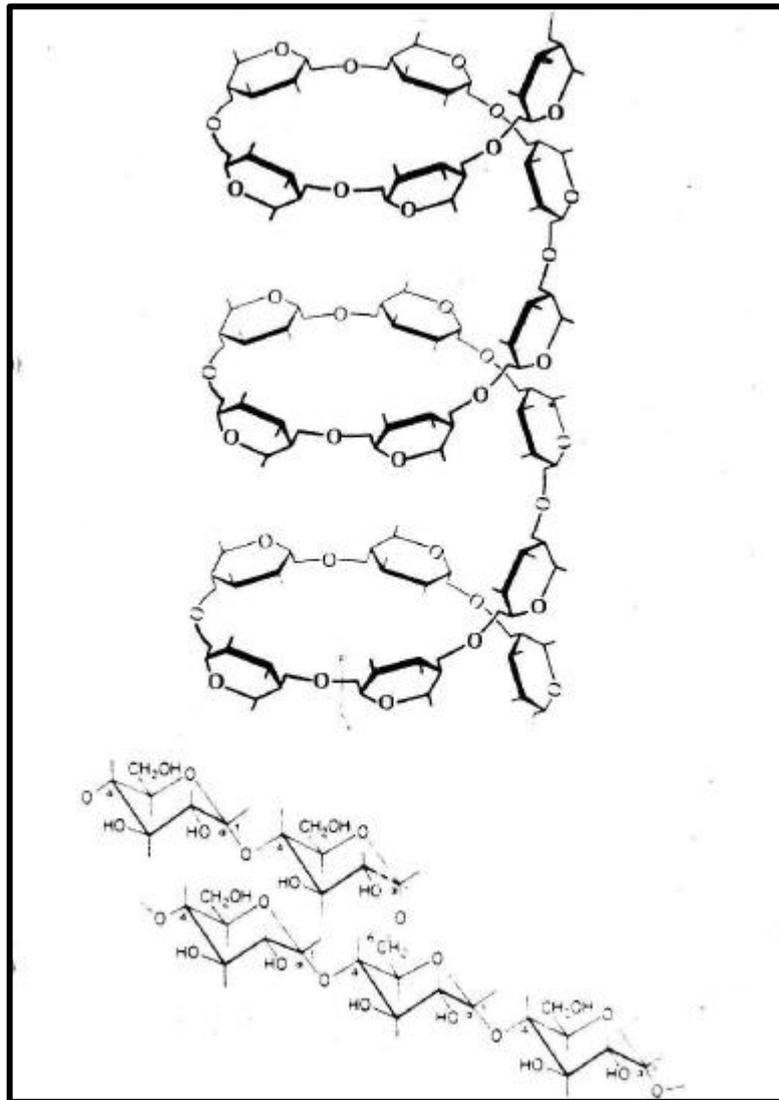


Figura 7. Configuración molecular tridimensional.

En términos generales, los almidones contienen aproximadamente 17-27% de amilosa y el resto de amilopectina. La concentración relativa de estos dos polímeros está regida por factores genéticos típicos de cada especie. Ver cuadro 1.

Cuadro 1. Características de algunos almidones usados en la industria alimentaria.

Tipo	Amilopéctina %	Amilosa %	Temperatura de gelatinización °C	Tamaño del gránulo m (micra)
Maíz	73	27	62-72	5-25
Papa	78	22	58-67	5-100
arroz	83	17	62-78	2-5
tapioca	82	18	51-65	5-35
Sorgo	99-100	0-1	67-74	5-25
trigo	76	24	58-64	11-41

Tanto la amilosa como amilo pectina influyen de manera determinante en las propiedades sensoriales y reológicas de los alimentos, principalmente mediante su capacidad de hidratación y gelatinización.

2.2. DESCRIPCIÓN FÍSICA EN LOS GRANOS DE ALMIDÓN

El almidón sirve de reserva energética en el reino vegetal y se encuentra en pequeños corpúsculos discretos que reciben el nombre de gránulos; en el tejido vegetal éstos ejercen presión osmótica muy baja, con lo que la planta almacena grandes cantidades de glucosa de una manera muy accesible sin romper el balance de agua interior. El tamaño y la forma del gránulo son características de cada especie botánica, y esto se ha aprovechado en el

desarrollo de diferentes métodos microscópicos para identificar el origen de los distintos almidones. A continuación se ilustran diferentes tipos de gránulos

El almidón de yuca, existen dos formas de granos: los más grandes tienen forma de timbal; es decir son planos, por una de sus caras y esferoidales por la otra, compuestos de dos granos, pero a veces se encuentran reunidos dos o más, la porción formada por el mayor de los tres que se hayan unidos, es redondeada por una de sus caras y muy esquinado por la otra.

Los granos sencillos son raros. La mayoría de ellos tiene una hendidura. El tamaño de los mayores alcanza como máximo 25 a 33 μ , a veces hasta 36 μ ; pero mucho de ellos no pasan de 15 a 23 μ . El de los pequeños es por término medio de 5 a 15 μ .

La estructura rígida de los gránulos esta integrada por capas concéntricas de amilosa y amilopectina distribuidas radialmente que permanecen inalterables durante la molienda, el procesamiento y la obtención de almidones comerciales.

Estos cuerpos son birrefringentes, es decir, tienen dos índices de refracción. Ordinariamente los granos son incoloros, de manera que si están unidos en masas, esta constituyen una capa incolora y transparente, más por lo general hay aire entre los granos. Por lo tanto, una semilla amilácea casi siempre tiene aspecto blanco, lo mismo que la harina obtenida de ella.

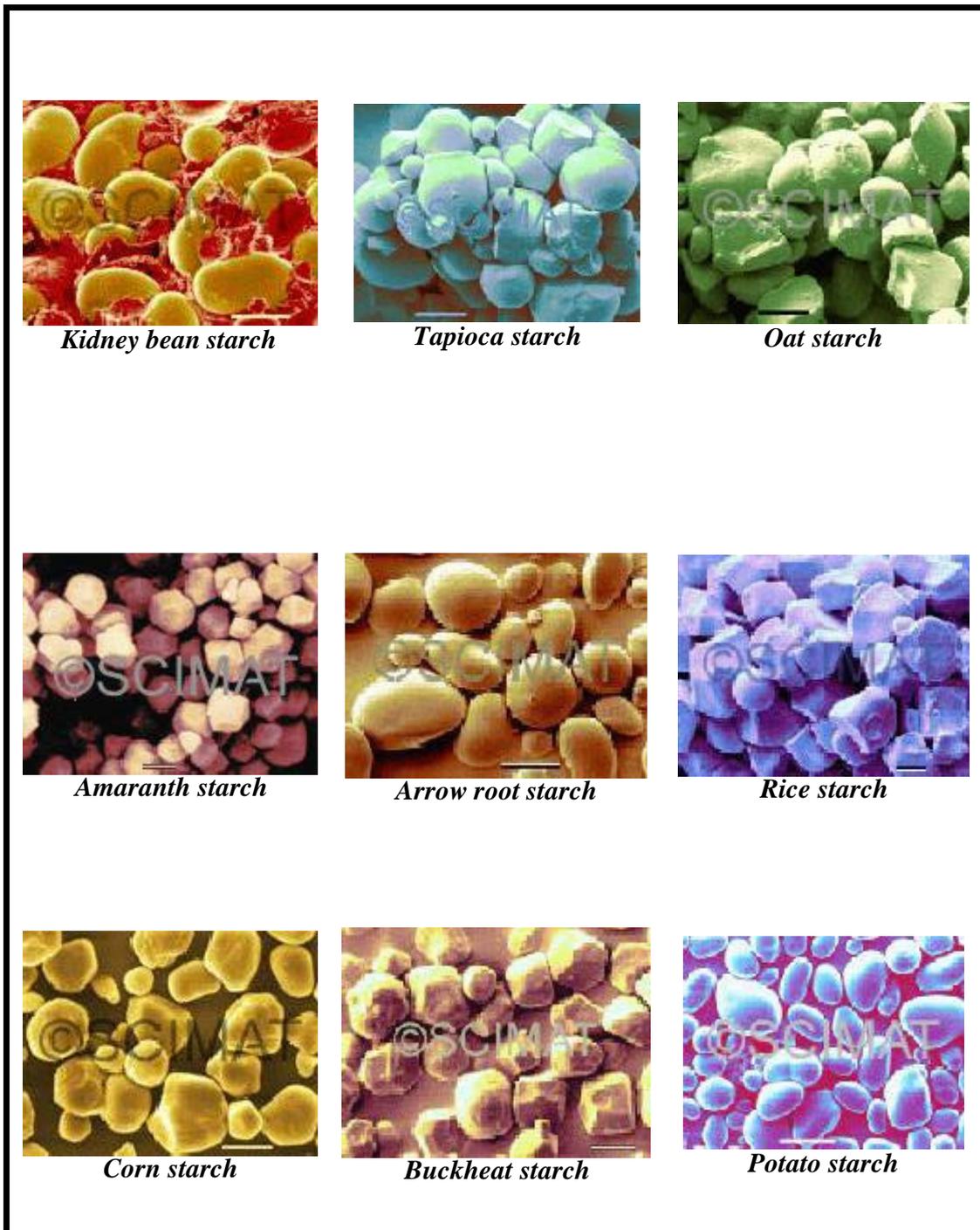


Figura 8 Gránulos de diversas especies de almidón

Las variables más importantes para diferenciar los distintos tipos de almidón, son las siguientes:

2.2.1. Tamaño. El almidón se encuentra siempre en forma de granos. Los granos son muy pequeños en el almidón primario y en el transitorio, y a veces tampoco más grande en el de reserva. Las proporciones de los granos amiláceos varían mucho.

Arroz	2 μ cúbicos
Patata	320000 μ cúbicos

Como regla general puede decirse, que las partes internas de los depósitos alimenticios siempre contienen granos mayores que las periféricas.

2.2.2. Forma. Rara vez se observa entre ellos concordancia de forma (centeno, trigo y cebada). Pero como exceptuando pocas suertes amiláceas (arroz, arrow root), en cada polvo de almidón no hay una sola forma y tamaño, sino a menudo formas diversas dentro de ciertos límites por su estructura y magnitud. Según su forma los granos de almidón se clasifican como:

- ✓ Redondeados o esféricos.
- ✓ Discoideos.

2.2.3. Núcleo y Estratificación Los granos más pequeños, muy rara vez son estratificados, pero si la gran mayoría de los de mayor tamaño. La estratificación, se produce por una modificación gradual del contenido en agua de las zonas sucesivas del grano. A una capa extrema pobre de agua sigue otra muy acuosa, luego otra pobre en agua, etc. El centro del grano, el núcleo, siempre es muy rico en dicho elemento.

Por virtud de su gran poder birrefringente, todas las zonas abundantes en agua aparecen claras y rojizas, las más pobres en agua, más oscuras y blanco azuladas. El núcleo es siempre el centro orgánico del grano, alrededor del cual se extienden todas las capas. Si se hallan en el centro matemático (cereales), las capas constituyen zonas concéntricas, si su suposición es excéntrica, también lo es de las capas.

En el último caso que es el más frecuente su anchura es muy desigual. Hacia el lado donde se halla el núcleo, son a menudo sumamente delgadas, mientras que en el extremo opuesto su género suele ser muy considerables. Los granos con núcleo central son redondos u oblongos, los que tienen núcleos excéntricos, irregulares y de formas variables. En los últimos el núcleo esta en el extremo más estrecho y esto sucede ordinariamente (patata) o en el más ancho (arrow root).

2.2.4. Refracción Estos cuerpos son birrefringentes, es decir, tienen dos índices de refracción, por lo tanto cuando se irradian con luz polarizada desarrollan la típica “*Cruz de*

Malta”, esto se debe a que dentro del gránulo se localizan zonas cristalinas de moléculas de amilosa ordenadas paralelamente a través de puentes de hidrógeno, así como zonas amorfas, causadas principalmente por la amilopectina que no tienen posibilidad de asociarse entre sí o con la amilosa. Por esta razón, los gránulos que contienen una proporción grande de la fracción ramificada no presenta birrefringencia; esta característica, al igual que su espectro de rayos X, se pierde cuando los gránulos alcanzan la gelatinización.

El almidón es un organoide, puede considerarse como un amilo-esfero-cristal, poroso, estratificado, constituido por muchas triquitas de amilosa cortas, el cual como todos los esfero cristales, crece por aposición. El almidón es insoluble en agua, alcohol, éter, cloroformo, bencina, solución amoniacal de ácido cúprico, etc. Del arrow root obtuvo McDonald 0.21% de hidratos de carbono solubles (Dextrina), todos los demás componentes del grano amiláceo son insolubles en agua fría.

La densidad varía algo según su procedencia y el contenido acuoso, pero es aproximadamente 1.5.

Como todos los granos son porosos, el almidón puede retener hasta 80% de agua, tal almidón no puede tamizarse todavía, y se apelmaza por compresión.

2.2.5. Reacción. La reacción característica del almidón es la que da con el yodo (1814, Colin y Gaultier de Claubry). En presencia de agua y ácido yodhídrico o de una sal yódica, la más pequeña cantidad de yodo, basta para teñir el almidón de rojo-azul, ya se halle en forma de grano o engrudo.

2.3. GELATINIZACIÓN

Los granos de almidón son insolubles en agua fría debido a que su estructura está altamente organizada y a que presenta una gran estabilidad debido a las múltiples interacciones que existen con sus dos polisacáridos constituyentes; sin embargo, cuando se calientan empieza un proceso lento de absorción de agua en zonas intermicelares amorfas, que son las menos organizadas y a las más accesibles, ya que los puentes de hidrógeno, no son tan numerosos ni rígidos como en las áreas cristalinas. A medida que se incrementa la temperatura, se retiene más agua y el granulo empieza a hincharse y aumentar de volumen, fenómeno que se puede observar en el microscopio, una vez que la parte amorfa se ha hidratado completamente, la cristalina inicia un proceso semejante, pero para esto se requiere más energía.

Al llegar a cierta temperatura, el granulo alcanza su volumen máximo y pierde tanto su patrón de difracción de rayos x, como la propiedad de birrefringencia. Si se administra más calor, el granulo hinchado, incapacitado para retener el líquido, se rompe parcialmente y la amilosa y la amilopectina, fuertemente hidratadas, se dispersan en el seno de la disolución.

La gelatinización, es un proceso de transición de un estado ordenado a otro desordenado en el que se absorbe calor. Es decir, la gelatinización transforma los gránulos de almidón insolubles, en una solución de las moléculas constituyentes en forma individual.

Para efecto de entender aún más el fenómeno de gelatinización, se estudia la cinética de la gelatinización tomando como patrón la técnica analítica de calorimetría diferencial de barrido, en el almidón de papa.

Con ella se ha encontrado que existen dos constantes de velocidad, dependientes de la temperatura, que son un reflejo de la presencia de las zonas amorfas y cristalinas.

Para visualizar mejor este fenómeno, la figura 14 muestra esquemáticamente el aumento de volumen de los gránulos, paralelo al aumento de la viscosidad de la dispersión acuosa. Una vez que los gránulos se rompen, la viscosidad se reduce hasta alcanzar un valor estable en el que se genera un gel cuyas características físico-químicas son en diferentes clases de almidón.

Se da el nombre de temperatura de gelatinización a aquella en la cual se alcanza el máximo de viscosidad y se pierden birrefringencia y el patrón de rayos x; esta temperatura es en realidad un intervalo ya que los gránulos, aunque provengan de la misma fuente botánica, tienen diferente composición y grado de cristalinidad, lo que provoca que sean más resistentes que otros. Por esta razón, se presenta una diferencia hasta de 10°C entre la

temperatura de gelatinización de los primeros gránulos y la de los últimos. Este parámetro también se ve afectado fuertemente por la presencia de diversos compuestos químicamente que favorecen o inhiben los puentes de hidrógeno.

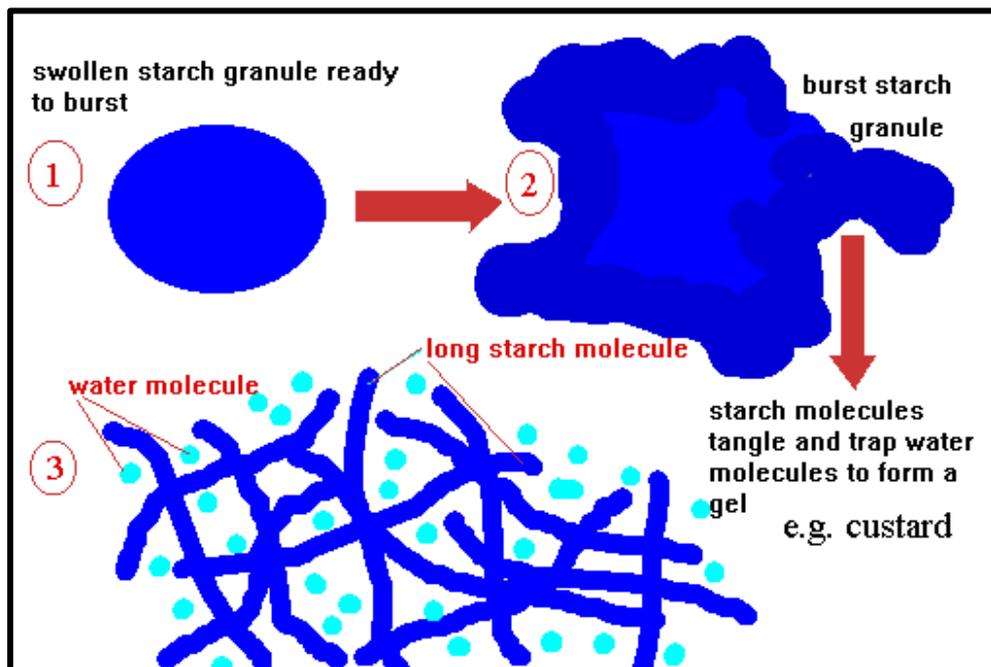


Figura 9. Proceso de gelatinización en un granulo de almidón

2.4. RETROGRADACIÓN

Este fenómeno se define como la insolubilización y la precipitación espontánea, principalmente de las moléculas de amilosa, debido a que sus cadenas lineales se orientan

paralelamente y accionan entre sí por puentes de hidrógenos a través de sus múltiples hidroxilos, se puede efectuar por diversas rutas que dependen de la concentración y de la temperatura del sistema.

Cada almidón tiene una tendencia diferente a la retrogradación que esta relacionada con su contenido de amilosa, ya que la Amilopéctina es más difícil que lo desarrolle, debido a que sus ramificaciones impiden la formación de puentes de hidrógeno entre moléculas adyacentes; sin embargo, si las soluciones de almidón se congelan y se descongelan continuamente, se produce su insolubilización. Las fracciones de amilosa o las secciones lineales de Amilopéctina que retrogradan, forman zonas con una organización cristalina muy rígida, que requiere de una alta energía para que se rompan y el almidón gelatinice.

Este fenómeno es más visible en el envejecimiento del pan; originalmente se pensaba que la modificación de este alimento se debía a la facilidad de la amilosa para retrogradar y formar zonas cristalinas y al efecto decisivo de la Amilopéctina. Durante el conocimiento del pan, parte de la amilosa se difunde fuera del granulo y retrograda en el momento de su enfriamiento, de tal manera que los restos de gránulo (ahora ricos en amilo pectina) se ven rodeadas por moléculas del polímero lineal; se considera que el envejecimiento se debe básicamente a la asociación de las cadenas amilo pectinas que permanecen el gránulo hinchado, después de haber perdido parte de la amilosa.

2.5. PH

Los valores de pH menores de 5 o mayores de 7 tienden a reducir la temperatura de gelatinización y a acelerar el proceso de cocción (Fig. 4). En condiciones muy alcalinas éste decrece considerablemente, mientras que en condiciones muy ácidas se favorece la hidrólisis del enlace glucosídico con la consecuente pérdida de la viscosidad.

2.6. INTERACCIÓN DEL ALMIDÓN CON OTROS CONSTITUYENTES.

2.6.1. Agua. El agua es uno de los factores que más afectan las propiedades, funcionales de estos polímeros. La intensidad y su grado de hinchamiento están en función directa de la concentración de este disolvente de tal manera que la adsorción se facilita a medida que aumenta la concentración.

2.6.2. Azúcares y sales. La presencia de glucosa y sacarosa ejerce una competencia por el agua de hidratación que trae consigo cambios en las propiedades reológicas de este hidrato de carbono, ya que reducen la velocidad de la gelatinización y la viscosidad final. El hecho de que una mezcla de almidón y sacarosa absorba menos agua que la calculada matemáticamente es un reflejo de la interacción que existe y que hace que el polímero no desarrolle toda su capacidad de hidratación. Las sales aceleran la velocidad de

gelatinización, mientras otras la reducen. La figura 3 muestra el efecto de las sales de la leche en la viscosidad del polímero; la diferencia de viscosidades entre las curvas B y C se debe fundamentalmente a la acción de las sales y los azúcares.

2.6.3. Emulsionantes y lípidos. Los emulsionantes que contienen ácidos grasos de cadena larga forman complejos con la amilosa a través de un mecanismo que parece ser muy similar al descrito para el de yodo-amilosa; cuando contienen más de 16 átomos de carbono reducen la velocidad de hinchamiento de los gránulos y aumentan su temperatura de gelatinización; se ha encontrado que, independientemente del tipo de emulsionante usado, la viscosidad máxima de las pastas de almidón es muy similar, y lo único que varía es la temperatura a la cual esto se alcanza. Por otra parte, los hidrocarburos de cadena corta y los triglicéridos reducen la temperatura de gelatinización sin importar el tipo de ácido graso que contengan.

2.7. MANUFACTURA DEL ALMIDÓN DE YUCA

Después de la celulosa, el almidón es el carbohidrato de mayor abundancia en la naturaleza. El almidón es una de las principales reservas de energía de las plantas y se encuentran en fuentes tan diversas como los cereales (maíz, trigo, cebada, arroz), la papa, la yuca y muchos otros cultivos.

El almidón es el carbohidrato más importante en la actividad humana por su función alimenticia y por sus múltiples aplicaciones en la industria y el comercio.

A diferencia de los almidones de cereales, que requieren procesos industriales muy tecnificados, los almidones de raíces y tubérculos (papa, batata, achira y yuca) son más fáciles de obtener en el medio rural.

El proceso general de extracción de almidón de yuca se ilustra en el diagrama de la figura 10.

En la extracción de almidón de yuca tienen lugar las siguientes etapas generales: lavado y pelado, rallado y tamizado, sedimentado, fermentado, secado, molido y empaque.

Las fábricas para obtención de almidón de yuca que existen en diferentes países, varían desde las que utilizan métodos de extracción completamente manuales hasta las totalmente mecanizadas en donde se aplican los sistemas más modernos de extracción. De acuerdo al nivel tecnológico de las empresas estas se clasifican en:

1. Fábricas pequeñas o rallanderías: Su capacidad instalada está entre 500 y 2500 kilogramos de yuca por día.
2. Fábricas medianas: La capacidad de procesamiento de estas fábricas es de 10 a 15 toneladas de yuca por día.

3. Fábricas grandes: Las fábricas grandes poseen una capacidad de procesamiento superior a 15 toneladas de raíces por día y el producto elaborado es un almidón de alta calidad.

A continuación se describe cada uno de las etapas del proceso de obtención de almidón de yuca y los métodos utilizados para diferentes tipos de fábricas.

2.7.1. Lavado de raíces. El propósito de esta operación es eliminar la tierra y las impurezas adheridas a la cascarilla de las raíces de la yuca, junto con esa misma cascarilla (corteza externa o periderma).

Los métodos más generalizados en las pequeñas y medianas rallanderías en Colombia son los siguientes:

1. Lavado / Pelado manual. Se ejecuta con las manos , aunque en algunas zonas de los departamentos del Cauca y de Caldas se hace también con los pies. La cascarilla se desprende por la fricción de unas raíces con otras durante el lavado. Esta operación emplea gran número de personas de la familia campesina y es, por ello, una fuente de ingreso para la comunidad. El pelado en las rallanderías antes mencionadas, las raíces se pelan manualmente (con cuchillos), es decir, se despojan de la corteza interior (parenquima cortical) estando ya lavadas y sin la cascarilla.

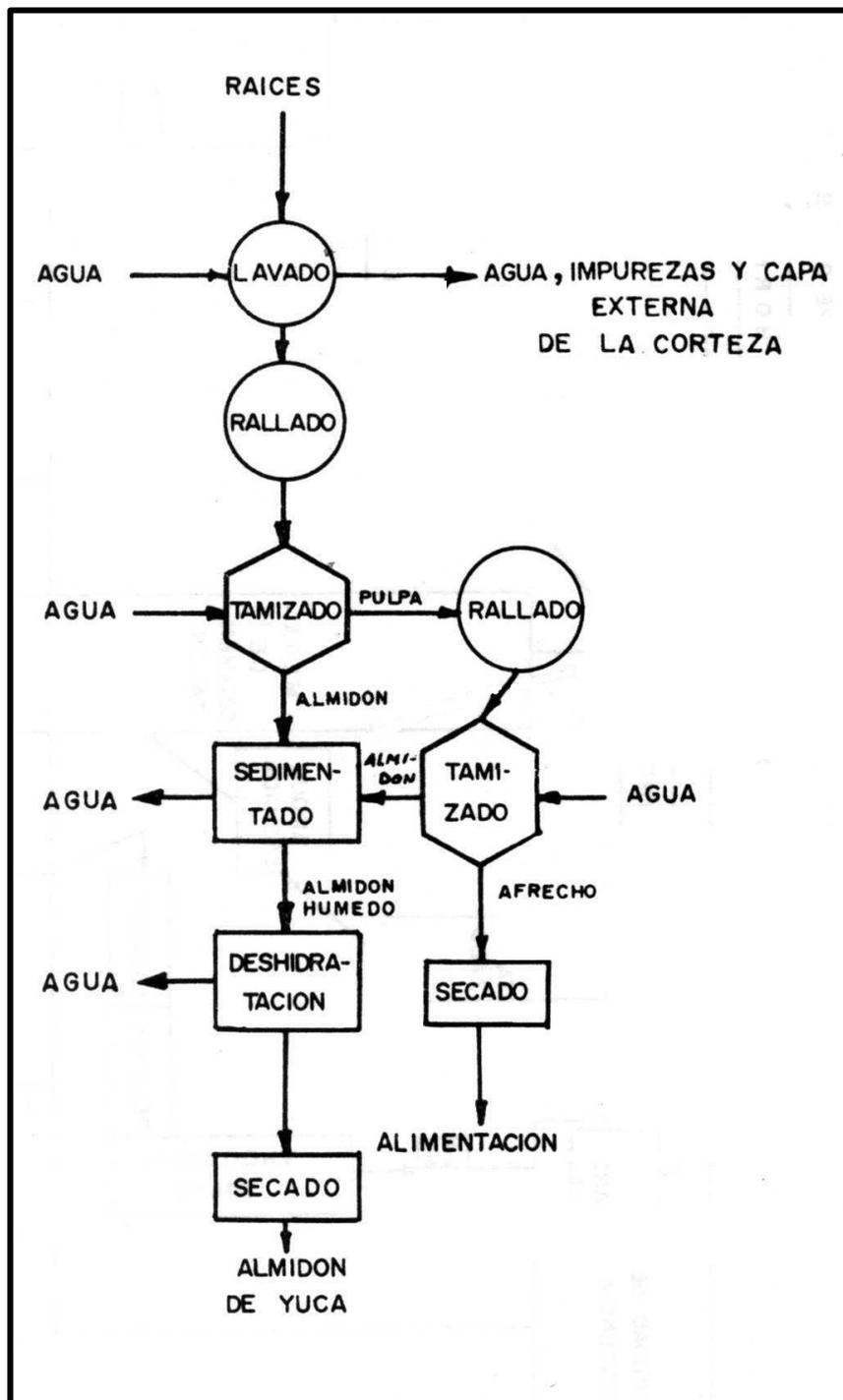


Figura 10. Diagrama del proceso general de extracción de almidón nativo de yuca.

2. Lavado / Pelado mecánico. El lavado / pelado mecánico se hace en un tambor cilíndrico, donde las raíces de yuca reciben chorros de agua mientras se friccionan las unas con las otras y contra la lamina del tambor. La lámina tiene agujeros rectangulares que permiten la salida de desechos del interior del tambor. El flujo de agua ayuda a desprender las impurezas y la cascarilla de las raíces.

2.7.1.1. Tipos de máquinas lavadoras

1. Lavadora / peladora cilíndrica de semieje para carga lateral: El cilindro esta soportado por un semieje acoplado a una caja de rodamientos en una de sus caras. El semieje acciona el cilindro. El conjunto se instala sobre una piletta que recibe agua y las impurezas. El cilindro (véase figura 11) esta formado por una lamina de hierro galvanizado que tiene agujeros ovalados, distanciados entre sí. Por estos orificios salen el agua y las impurezas (suelo y restos de cascarillas).

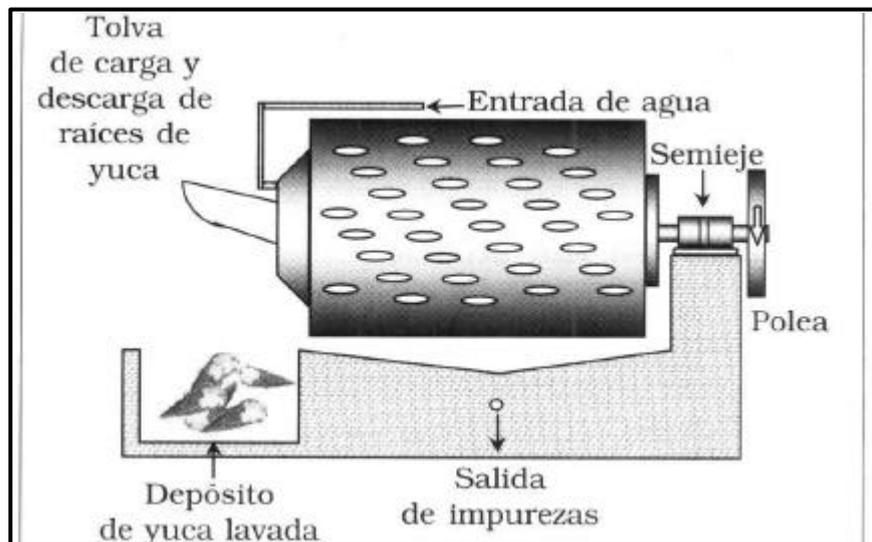


Figura 11. Lavadora/peladora de raíces de yuca, de cuerpo cilíndrico y semieje, para carga lateral.

Esta lavadora se carga y se descarga a través de una abertura semicircular situada en el centro de uno de sus lados (o bases) del cilindro. En ese lado hay además una tolva (o un aditamento similar) que ayuda a hacer las labores de carga y descarga; estas se ejecutan manualmente en forma muy práctica y fácil y no requieren que se detenga la máquina. Por consiguiente, la operación de lavado/pelado con esta máquina es rápida y prácticamente continua.

Por la misma abertura lateral entra un tubo perforado para el suministro del agua . Las raíces salen de la máquina lavadas y peladas y caen en un depósito bajo la tolva.

2. Lavado/peladora cilíndrica de eje central para carga frontal: Es un cilindro con un eje central extremos están soportados por rodamientos o chumaceras (véase figura 12). Las paredes del cilindro son de lámina galvanizada y tiene agujeros ovalados o rectangulares. La compuerta de carga y descarga va a lo largo del cilindro. Por encima del cilindro, y paralelo a este, un tubo con perforaciones deja caer agua a presión sobre el cilindro.

Estas lavadoras/ peladoras son difíciles de cargar y descargar, su arranque es también difícil y las tandas de lavado y pelado se demoran mucho.

3. Lavadora/peladora cilíndrica semicontinua: Es un cilindro con un eje central que gira sobre los rodamientos o chumaceras. Las paredes del cilindro son de lamina galvanizada y tienen agujeros ovalados o rectangulares para facilitar la salida del agua y las impurezas. Al cilindro se acopla una tolva de recepción en uno de los extremos; en el otro hay una compuerta de salida.

El agua es suministrada por un tubo bifurcado cuyos extremos pasan, sin impedir la libre rotación del cilindro, por orificios situados uno en el lado derecho y otro en el lado izquierdo del mismo cilindro, véase figura 13. En algunas máquinas de este modelo, el agua suministrada del eje central que estará, por tanto, perforado.

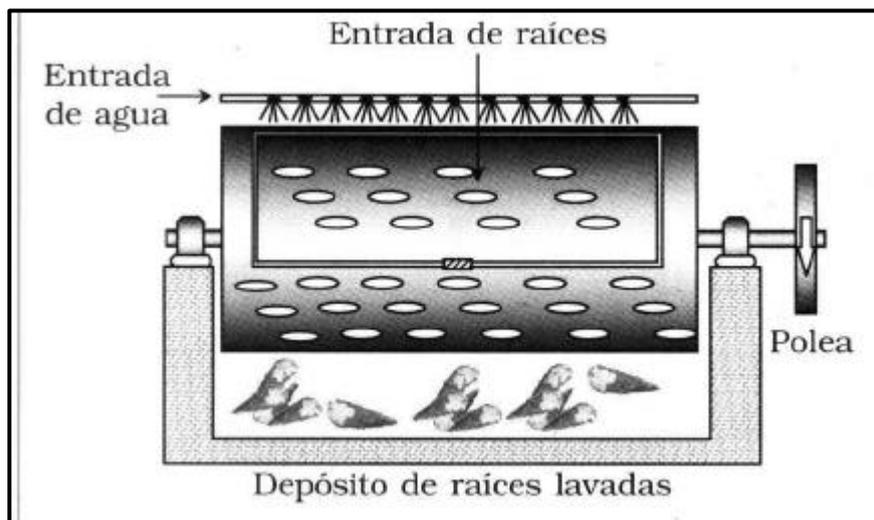


Figura 12. Lavadora / peladora de raíces de yuca. De cuerpo cilíndrico y eje central, para carga frontal

2.7.2. Rallado de las raíces. En el rallado se liberan los gránulos de almidón contenidos en las células de la raíz . El porcentaje de extracción de almidón depende del rallado. Si este no se deshace bien el tejido de la raíz para separar los gránulos de almidón de las fibras, el rendimiento del proceso de extracción es bajo y se pierde mucho almidón en el afrecho desechado.

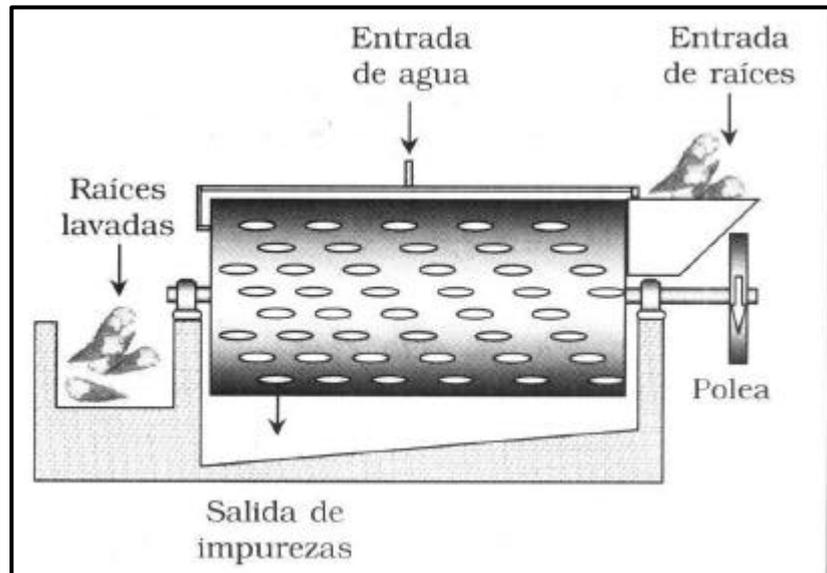


Figura 13. . Lavadora / peladora de raíces de yuca. De cuerpo cilíndrico y eje central, de acción semicontinua

El rallado no puede ser demasiado fino por que los gránulos muy pequeños de almidón sufrirían daño físico y, más tarde, deterioro enzimático. El rallado que se hace actualmente en medianas rallanderías tiene un efecto rallador cercano al 80%. En las fábricas grandes, en donde poseen equipos eficientes, se alcanza un efecto rallador cercano al 85%, cuando se repasa el material, esta eficiencia se puede aumentar hasta el 90%.

La eficiencia del rayado se puede medir por la ecuación 1.

$$ER = \left\{ 1 - \frac{A_A x F_R}{A_R x F_A} \right\} x 100$$

1)

A_A = almidón recuperado en el afrecho (%)

F_R = Fibra cruda en las raíces frescas (%)

A_R = Almidón en las raíces frescas (%)

F_R = Fibra cruda en el afrecho (%)

Una de las maneras de obtener la información necesaria para calcular **ER**, consiste en determinar el contenido de almidón y fibra de una muestra de raíces, rallarla y tamizarla y analizar en el afrecho estos mismos componentes.

2.7.2.1. Rallador o rallo. Es un cilindro de madera que va montado en un eje de hierro. El cilindro está recubierto por fuera con una lámina de hierro galvanizado que se perfora manualmente con un clavo (o con punzón) en toda su área. Se hacen, generalmente, una o dos perforaciones por cm^2 .

La velocidad de rotación del cilindro varía de 1200 a 1300 rpm. El rendimiento promedio del equipo es de 1500 Kg de raíces por hora. Cuando se ralla con agua consume 90 Lt. por cada 100 Kg de raíces. La superficie áspera y cortante del tambor, constituida por los bordes fluidos de múltiples agujeros, establece una línea de corte (un rallo) con la cara interior de una tabla colocada frente al tambor. Ese rallo produce una masa de ralladura de yuca, que será fina o gruesa según el espacio (o luz) dejado entre el tambor y el borde de madera. (figura 14)

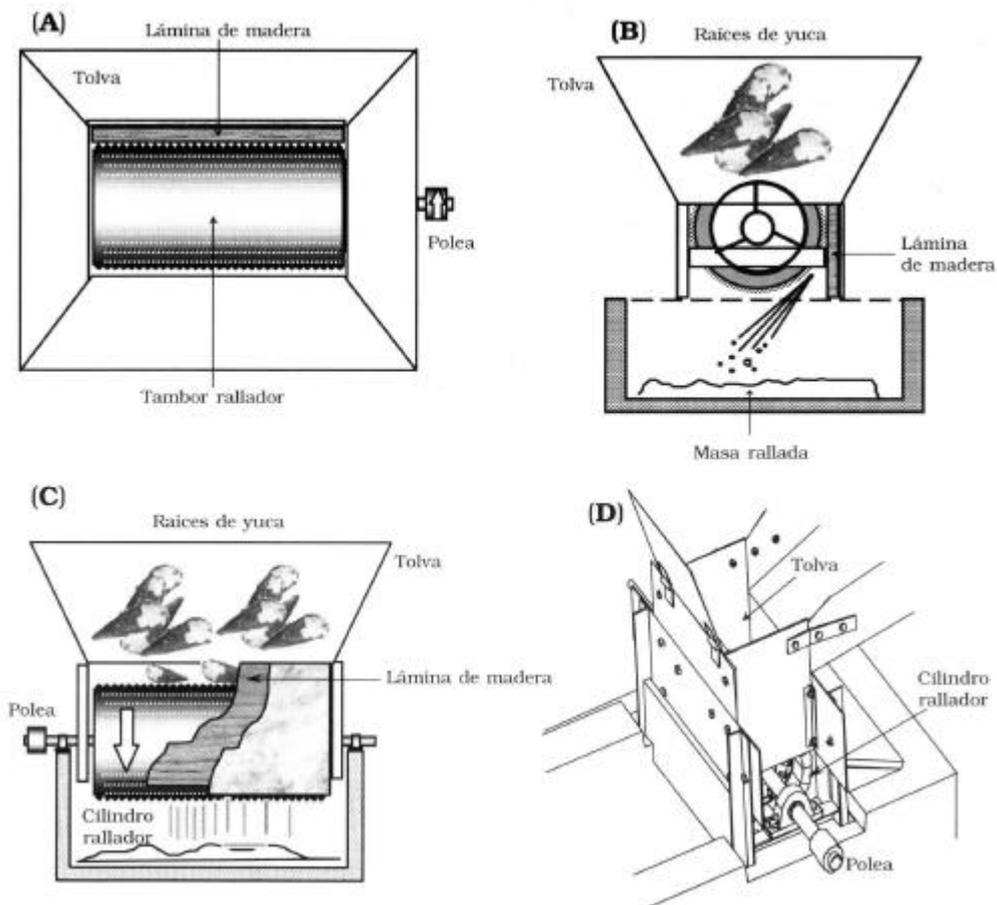


Figura 14. Rallador tradicional de raíces de yuca en que la superficie externa del cilindro es una lámina perforada .

Donde, (A) Vista superior. (B) Vista lateral. (C) Vista frontal. (D) Dibujo técnico de una máquina ralladora.

2.7.3. Colado o tamizado. La pulpa en que quedan convertidas las raíces de yuca después del rallado se mezcla con agua abundante y se tamiza o se cuela. El agua que pasa por el tamiz arrastra el almidón libre y otros materiales finos, mientras que el tamiz retiene el material grueso y el de mediana finura, constituido principalmente por fibra y porciones de raíces no desintegradas.

En las industrias familiares lo mismo que en las fábricas pequeñas y en las medianas se tamiza en tela de lienzo. En algunas industrias medianas y en las fábricas grandes esta operación se hace en tela de nylon o en mallas metálicas.

Las mejores mallas son la de bronce, fabricadas de acuerdo a la norma internacional, según la cual se denominan por números que correspondan al número de aberturas que tienen por pulgada lineal. Esta norma contempla el diámetro del hilo y la amplitud de las aberturas.

El subproducto de esta operación de colado es el afrecho. Una vez secado al sol, el afrecho se usa como complemento de concentrados para animales o se ofrece directamente en la alimentación animal. El análisis químico indica que el afrecho seco tiene un contenido de materia seca de 80% a 85%; de esta corresponden a almidón un 60%-70% y a fibra un 12%-14%. Estos valores se relacionan, por ejemplo, con los obtenidos en el balance de masas de la figura 7,¹ para 1000 kg de raíces frescas de yuca; así en la casilla “Afrecho” tenemos un contenido de almidón de 56.0 kg que corresponde al porcentaje antes indicado:

¹ Diagrama de flujo del proceso de obtención de almidón modificado de yuca (variedad M Ven 25 con 35% de M.S. en la rallandería La Agustina, en el departamento del Cauca, Colombia

$$56.0\text{kg}/90.1 \text{ kg} \times 100 = 62.2\%$$

En muchas rallanderías se hace pasar la lechada de yuca por pequeños tamices después del colado. Los movimientos de vaivén de estos tamices retienen las fibras finas que pudieron filtrarse en la coladora.

La operación de colado o tamizado puede hacerse manualmente, con coladoras mecánicas continuas o coladoras mecánicas por tandas.

2.7.3.1. Método manual. El colado manual se hace a través de una tela que se fija a un marco de madera; el conjunto se instala sobre un depósito o tanque donde se sedimentara la lechada de yuca rallada que pase por la tela, ver figura 15.

El rendimiento obtenido manualmente es igual al que se obtiene con las coladoras mecánicas utilizadas en la mayoría de las rallanderías. En realidad, este rendimiento depende de la variedad de yuca, del tipo de rallado empleado, del número de personas que intervienen en la operación y de la destreza de estas.



Figura 15. Colado manual de la masa de yuca rallada.

2.7.3.2. Método mecánico continuo. En el departamento de Caldas se emplean unas coladoras continuas de madera, con tornillo sin fin, soportadas en su parte inferior por un lienzo de la misma longitud del sin fin. La coladora se coloca debajo del rallador para facilitar el flujo de la masa rallada. Véase figura 16.

El sinfín, que tiene una longitud de 3.5 a 5 mts, hace una buena extracción del almidón y facilita la operación expulsión y compresión de las fibras. Acelera, por tanto, el secado posterior de este subproducto.

La capacidad de una coladora de este tipo es de 200 a 250 Kg de yuca por hora, se usan actualmente en la zona de Riosucio, Caldas.



Figura 16. Colado continuo de la masa rallada, empleando un tornillo sin fin

2.7.3.3. Método Mecánico discontinuo. Esta coladora mecánica consta de un cilindro asociado a un semi eje, el cual gira apoyado en una caja de rodamientos; su velocidad de rotación es de 20 a 22 r.p.m.. Se carga y descarga lateralmente mediante un aditamento (figura 17).

Dentro del cilindro hay aspas que mezclan la masa rallada de yuca con agua. La lámina interior del cilindro esta cubierta por una malla de tela o nylon, cuya trama es de 80 mesh,

en la que se tamizan mezclas de masa rallada y agua. Esta malla permite el paso de la lechada de almidón y retiene la fibra o afrecho.

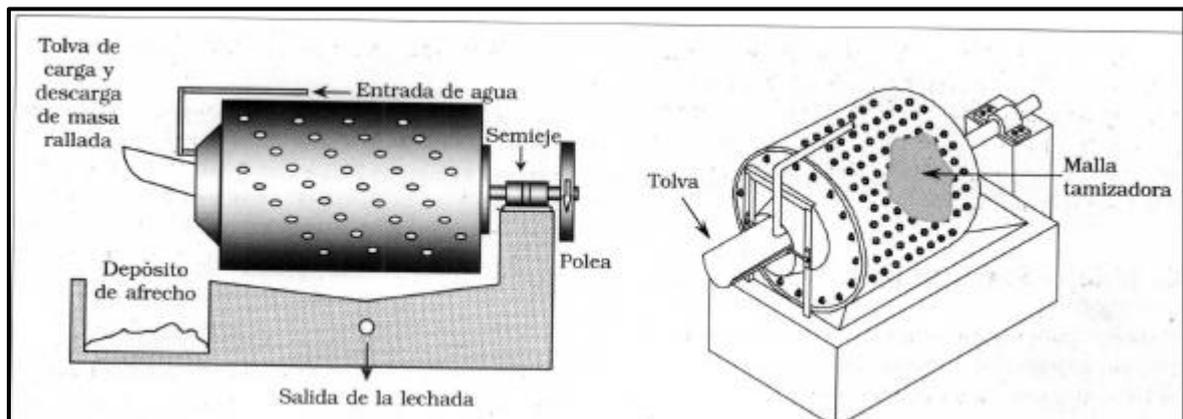


Figura 17. Coladora mecánica discontinua de cilindro y semi eje para colocar o tamizar la masa de yuca rallada

La capacidad normal de esta coladora mecánica es de 250 a 300 kg de masa rallada por hora.

La calidad del almidón, respecto a su contenido de fibra e impurezas, depende de la malla que se utilice. Se puede obtener almidón de mejor calidad empleando mallas de 120 mesh, o más finas.

Otro modelo de este tipo está soportado en cuatro rodamientos (o rodillos), los cuales transmiten el movimiento al cilindro; la transmisión (polea y ejes) mueve dos rodamientos,

los cuales transmiten el movimiento al cilindro, que se apoya también en los otros dos rodamientos, véase figura 18.

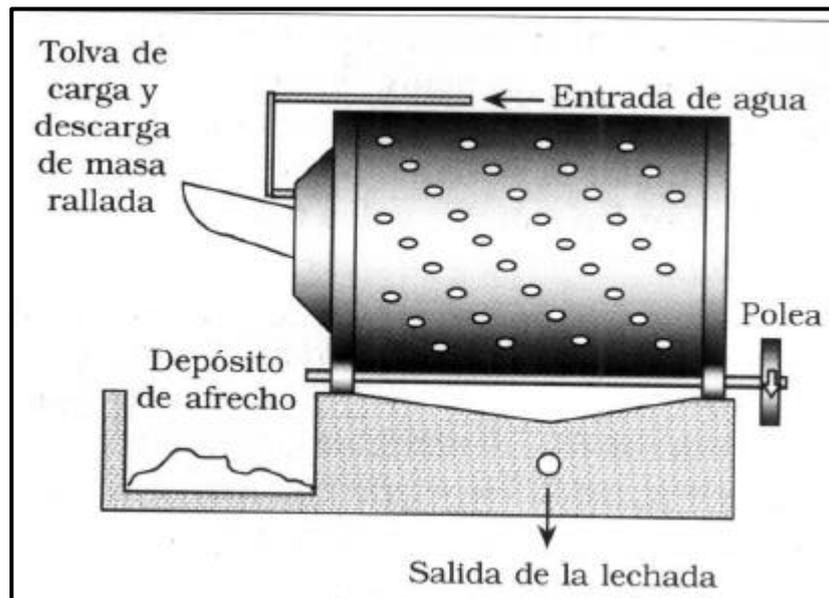


Figura 18. Coladora mecánica de cilindro soportada sobre cuatro rodamientos

2.7.4. Sedimentación del almidón. La lechada que sale del tamiz contiene los gránulos del almidón, fibra fina y material proteico en suspensión. Para separar el almidón del resto de los elementos y del agua, se efectúa la sedimentación en las fábricas pequeñas y medianas, a través de tanques de sedimentación y a través de canales de sedimentación; mientras que en las fábricas grandes este proceso de separación del almidón se realiza a través de una serie de equipos especializados, que más adelante describiremos.

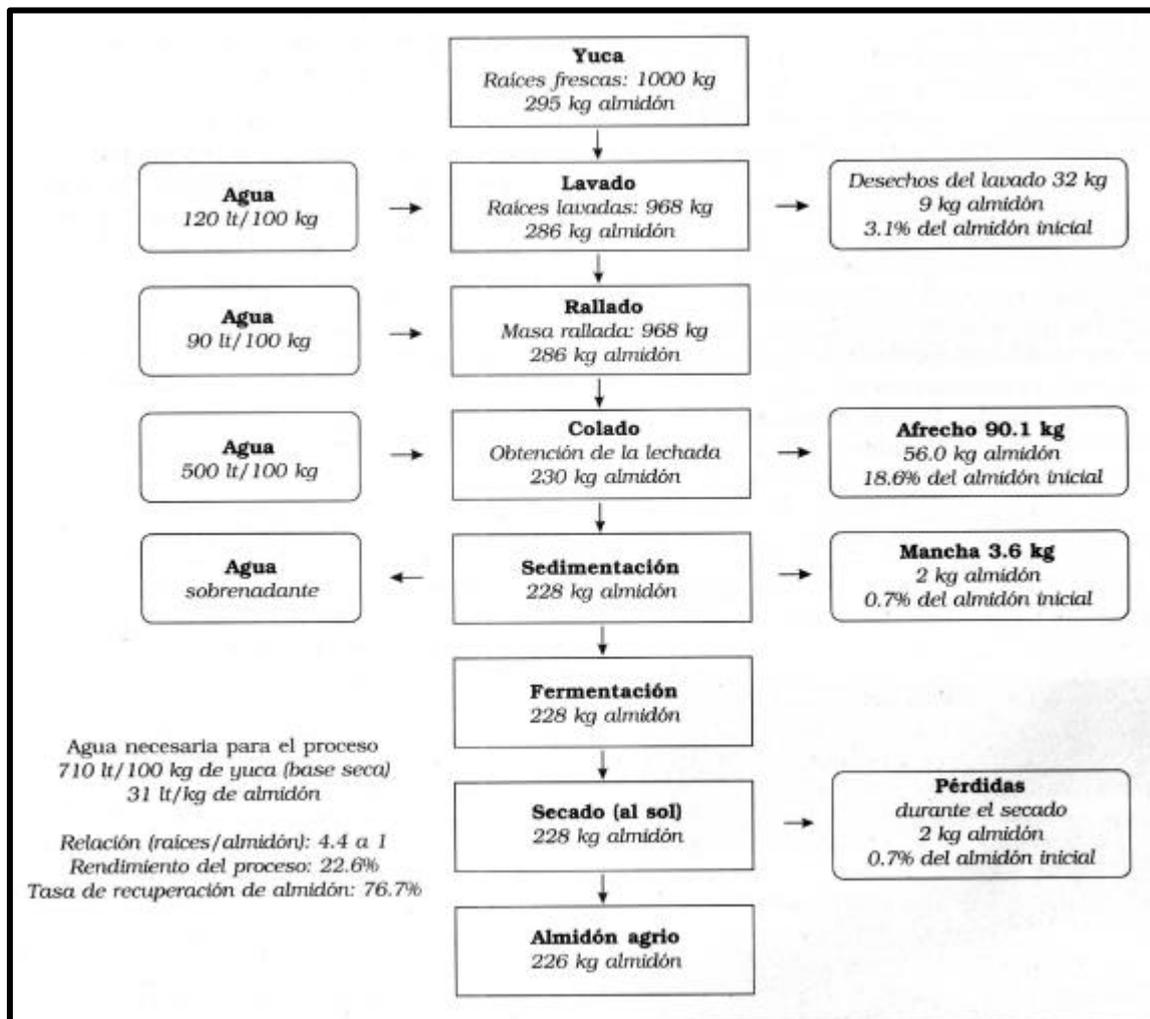


Figura 19. Diagrama de flujo del proceso de obtención de almidón modificado de yuca y balance de rendimiento de almidón

1. Tanques de sedimentación: Estos tanques se construyen con ladrillo y se recubren con baldosín. El volumen de agua que pasa por ellos, por toneladas de raíces frescas, es de 5 m³. Los tanques se convierten en una limitante del proceso por el trabajo que requieren, ya que hay que esperar hasta 8 horas para que el almidón quede sedimentado en un tanque.

Los tanques tienen otros dos inconvenientes, permiten que se mezcle el almidón con la mancha y que se pierda hasta un 2% del almidón sedimentado cuando éste se desmancha. La labor de retirar la mancha (desmanchar) consiste en limpiar la parte superior de la capa de almidón sedimentado empleando agua y una herramienta manual de limpieza que tiene un borde recubierto con caucho. Ver figura 20.

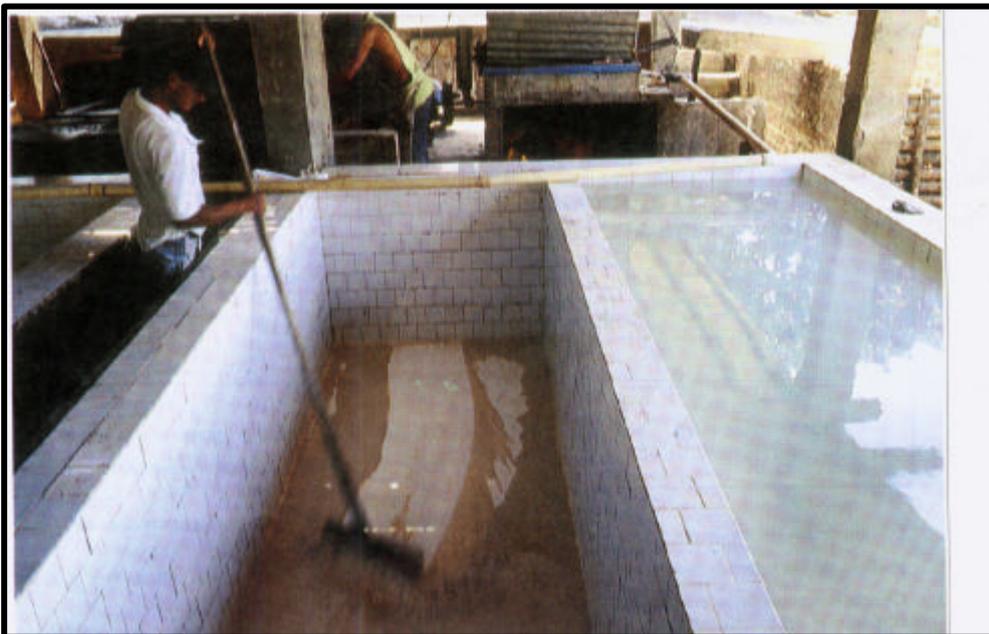


Figura 20. Almidón sedimentado en tanques (el operario “desmancha” una capa).

2. Canales de sedimentación: Los canales de sedimentación se recubren con baldosín o con materiales similares que permitan un flujo laminar de la lechada. Su longitud total varía de 100 a 200 m y no deben tener pendiente o inclinación durante su recorrido. Al

sedimentarse gradualmente, el almidón crea una ligera pendiente que facilita el flujo de la lechada restante. Se ha recomendado un sistema que consta de siete canales de 25 a 30 m de largo cada uno. Estos sistemas pueden diseñarse de manera que se adapten a la topografía del terreno.

A la entrada de los canales debe haber una pequeña caja desarenadora, donde la arena y otros sólidos de la lechada puedan sedimentarse. Al terminar la sedimentación, se obtienen tres capas en los canales y dos tipos diferentes de almidón. Véase figura 21.

- ✓ La capa inferior es el almidón.
- ✓ La intermedia, denominada mancha, es un almidón mezclado con material proteico; su espesor es variable.
- ✓ La capa superior es el agua sobrenadante o residual.

En las fábricas grandes, el proceso de separación de la fase sólida (almidón) se realiza a través de un sistema, conformado por un ciclón hidrodinámico, el cual separa la carga de proteína suspendida en el agua (dejando la lechada en una concentración de 5° Be), un ciclón concentrador, el cual aumenta la concentración de 5 ° Be a 20°Be, esta corriente de 20°Be pasa a un tanque y la corriente de agua pasa a las piscinas de oxidación para su recuperación. Para separar la fase sólida (almidón), existe un mecanismo muy utilizado en las fábricas grandes o tipo III, este es el *filtro de vacío*; en el se forma una torta. Consta de un tambor grande con una tela permeable para el agua e impermeable para el almidón, el cual por efecto del vacío se adhiere a la tela, y debido a que el tambor gira muy próximo a

una cuchilla, la torta es raspada y el almidón cae. El filtro de vacío se alimenta del tanque de concentrado con un almidón de 20°Be.

2.7.5. Secado del almidón. El secado es la operación de deshidratación del almidón húmedo mediante exposición al calor. El almidón nativo se seca empleando medios naturales o artificiales; el almidón fermentado debe secarse solamente con calor solar.

El secado realizado mediante la luz solar, se realiza sobre polietileno de espesor no. 6 de color negro que capta por ello mayor radiación solar y facilita el secado rápido y uniforme; y se extiende en capas que tengan una densidad de 1 a 2 kg/m². Para secar, por tanto, una tonelada de almidón se necesitarían aproximadamente, 1000 m² de superficie de secado.

Por consiguiente, el área de secado es otra de las limitantes que afecta sensiblemente a numerosas rallanderías que se encuentran en regiones de topografía muy quebrada. La operación de sacado del almidón necesita aproximadamente, 6 horas de sol en Colombia. El almidón se remueve suavemente dos o tres veces durante este periodo con rastrillos hechos de materiales blandos para que no dañen el plástico.

En la fase de secado, las fábricas grandes emplean centrifugas para reducir la humedad del almidón antes de llevarlo a los secadores; el sistema de secado puede ser de correas sin fin, de cámaras aisladas, neumáticos o de túnel.



Figura 21. Sistema de siete canales para la sedimentación del almidón a partir de la lechada de yuca

2.7.6. Tratamiento final del almidón. El almidón después de secado forma terrones de cierta dureza y necesita un tratamiento posterior para pulverizarlo; dicho procedimiento consiste en molerlo y cernirlo. El cernido se realiza en mallas, cuya finura depende de las características del producto que se desea obtener (de 100 a 120 mesh)

Se acostumbra a empacar el almidón en sacos de yute, papel o algodón. En Colombia, los productores pequeños empacan en sacos de yute y los fabricantes de volúmenes mayores lo hacen en saco de papel.

El almidón se hace arrumando los bultos de almidón en bodegas bien ventiladas. El almidón guardado con un contenido de humedad de 12 a 14% se conserva en perfectas condiciones por periodos superiores a cinco meses.

2.7.7. Rendimiento. La figura 22 resume, en un diagrama general de flujo, el proceso de obtención del almidón agrio de yuca tal como se práctica en la rallandería La Agustina, en el departamento del Cauca, Colombia. El diagrama contiene un balance de almidón que dan 1000 kg de yuca fresca de la variedad M Ven 25.

La figura 22, representa un diagrama de flujo del proceso de obtención de almidón agrio de yuca (variedad M Ven 25 con 35% con 35% M.S.) en la rallandería La agustina, en el departamento del Cauca, Colombia, y balance del rendimiento de almidón.

El almidón inicial, en este ejemplo, está representado en los 295 kg contenidos en los 1000 kg iniciales de yuca fresca; de este contenido se recuperan 226 kg de almidón agrio, o sea, 76.7%.

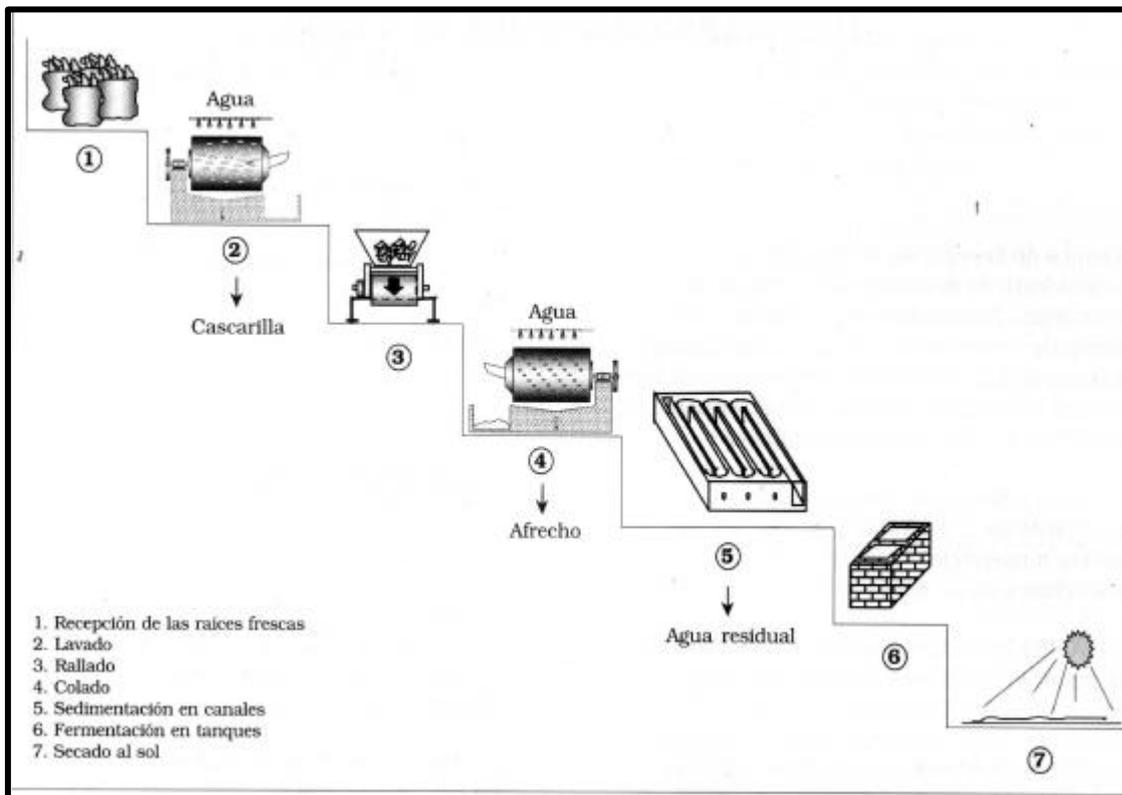


Figura 22. Distribución esquemática de las operaciones de producción de almidón de yuca en una rallandería.

2.7.8. Manejo de insumos

1. Agua: El agua que se emplea en el proceso de obtención del almidón de yuca proviene de diversas fuentes y tiene las siguientes características.

- El agua de lagos, ríos, quebradas y pozos superficiales esta contaminada, generalmente, con materia orgánica y microorganismos.

- Las aguas de manantial tienen, por lo regular, un bajo contenido de minerales y son muy buenas para este proceso.
- El agua de pozos profundos está libre, en comparación con la superficial, de materia orgánica y microorganismos, por que las capas del suelo la purifican a medida que se infiltra en ellas, alejándose de la superficie.

Un pozo subterráneo puede contaminarse, sin embargo, por la presencia de pozos sépticos, cloacas y cañerías abandonadas. Se ha observado que el agua contaminada recorre grandes distancias a través de vetas de piedra caliza y otros materiales porosos para contaminar, finalmente, las aguas fluviales.

Es recomendable construir un filtro natural para el agua empleada en el proceso; consta de capas de grava gruesa, grava fina y arcilla que reducen los minerales y sólidos en suspensión contenidos en agua de riachuelos, ríos y pozos.

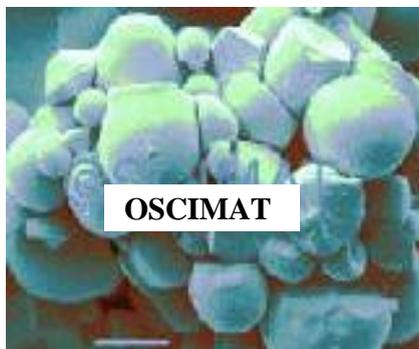
El agua que sale de los canales de sedimentación suele verterse en depósitos, de donde puede llevarse a un proceso de depuración. Cuando no se desecha, finalmente, en una corriente natural de agua, puede utilizarse de nuevo, esta vez en el lavado de la yuca. Se ahorra así cerca del 17% del agua que consume todo el proceso de obtención de almidón.

La extracción de almidón de yuca requiere agua en volúmenes grandes. Para lograr una buena limpieza en el caso de las raíces sin pelar, tal como legan del cultivo, las fábricas medianas y pequeñas requieren una cantidad de agua no inferior a siete metros cúbicos por tonelada de raíces.

Las grandes fábricas requieren más cantidad de agua por toneladas de raíces debido a que lavan varias veces el almidón para obtener altas calidades. Allí, aun cuando el volumen de agua puede variar de acuerdo con la fábrica, se puede decir que en promedio se gastan alrededor de 32 metros cúbicos por tonelada de yuca procesada.

2. Materia prima: La calidad de la yuca empleada es fundamental para lograr un buen porcentaje de extracción de almidón de buena calidad, es decir, que tenga buena capacidad de panificación (crecimiento de la masa durante el horneado) es indispensable, por tanto, seleccionar bien la variedad de yuca que se cultivará y las raíces que se procesarán.

ALMIDÓN DE YUCA



Nombre Científico	: Manihot esculenta crantz
Nombre común	: Mandioca
Reino	: Vegetal
Clase	: Angiospermae
Sub – clase	: Dicotiledónea
Orden	: Euphorbiae
Familia	: Euphorbiaceae
Género	: Manihot
Especie	: esculenta crantz

El almidón de yuca existen dos diferentes configuraciones:

- *Amilosa* esta en la forma de cadenas lineales: contribuye en las propiedades gelatinizantes
- *Amilo pectina* es altamente ramificado: contribuye al aumento de la viscosidad

Cuadro 2. Propiedades fisicoquímicas del almidón de yuca

VARIABLES	CARACTERÍSTICAS	OBSERVACIONES
Descripción Física		
Tamaño Granulo	10µm	OSCIMAT
Forma gránulos	Esfero cristales, poroso, estratificado	
Tipo de humedad	Humedad ocluida	La humedad puede quedar ocluida por retención en capilares diminutos
Núcleo-estratificación gránulos	Excéntrico	
Densidad	1.5	Laboratorio
Volumen específico		
Tamaño de grano		
Color	incoloro	El color blanco se produce por el aire al interior del gránulo
Olor	Inodoro	Por ser un material higroscópico, esta expuesto a absorber los olores del medio
Propiedades Químicas		
Amilosa	17-27%	La combinación relativa de estos dos polímeros esta regida por factores genéticos
Amilo pectina	83-73%	
Temperatura de Gelatinización	62.5°C	
Peso molecular		
Humedad	50%	Todos los granos de almidón son porosos, no puede tamizarse todavía, y se apelotona por compresión
Conductividad Térmica		
PH		

3. EQUIPOS PARA LA DESECACIÓN DE SÓLIDOS

3.1. CLASIFICACIÓN DE LOS SECADORES

Hay varias maneras de clasificar los equipos de desecación. Las dos clasificaciones más útiles se basan en el *método de transmisión de calor a los sólidos húmedos, o las características de manejo y las propiedades físicas del material mojado*. El primer método de clasificación revela las diferencias en el diseño y el funcionamiento del secador, mientras que el segundo es más útil para seleccionar entre un grupo de secadores que se someten a una consideración preliminar en relación con un problema de desecación específico.

Según la transmisión o transferencia de calor, los secadores se clasifican en dos grandes grupos, *secadores directos* y *secadores indirectos*

3.1.1. Secadores directos

1. El contacto directo entre los gases calientes y los sólidos se aprovecha para calentar estos últimos y separar el vapor.

2. Las temperaturas de desecación varían hasta 1000 K, que es la temperatura limitante para casi todos los metales estructurales de uso común.
3. A temperaturas de gases inferiores al punto de ebullición, el contenido de vapor de un gas influye en la velocidad de desecación y el contenido final de humedad del sólido.
4. Para desecaciones a temperaturas bajas y cuando las humedades atmosféricas son excesivamente elevadas, quizá sea necesario deshumidificar el aire de desecación.
5. un secador directo consume más combustible por libra de agua evaporada cuanto más bajo sea el contenido de humedad.

3.1.2. Secadores indirectos.

1. El calor se transfiere al material húmedo por conducción a través de una pared de retención de sólidos, casi siempre de índole metálica.
2. Las temperaturas de superficie pueden variar desde niveles inferiores al de congelación en el caso de secadores al de congelación hasta mayores que 800 K en el caso de secadores indirectos calentados por medio de productos de combustión.
3. Los secadores indirectos que utilizan fluidos de condensación como medio de calentamiento son en general económicos, desde el punto de vista del consumo de calor, ya que suministran calor sólo de acuerdo con la demanda hecha por el material que se está desecando.
4. Los secadores indirectos son apropiados para desecar a presiones reducidas y en atmósferas inertes, para poder recuperar los disolventes y evitar la formación de mezclas explosivas o la oxidación de materiales que se descomponen con facilidad.

5. La recuperación de polvos y materiales finamente pulverizados se maneja de un modo más satisfactorio en los secadores indirectos que los directos.

3.1.3. Secadores diversos. Los secadores infrarrojos dependen de la transmisión de energía radiante para evaporar la humedad. La energía radiante se suministra eléctricamente por medio de lámparas infrarrojas, resistencias eléctricas o refractarios incandescentes calentados por gas. Este último método ofrece la ventaja adicional del calentamiento por convección. El calentamiento infrarrojo no se utiliza comúnmente en la industria química para eliminar la humedad, y su aplicación principal es el horneado o la desecación de capas de pintura y en el calentamiento de capas delgadas de materiales.

Los secadores dieléctricos no han encontrado hasta ahora un campo muy amplio de aplicación. Los secadores de calor dieléctrico operan sobre el principio de la generación de calor dentro de los sólidos, colocándolos dentro de un campo eléctrico de alta frecuencia.

3.2. SELECCIÓN DEL EQUIPO DE DESECACIÓN

3.2.1. Selección inicial de los secadores. Se deben seleccionar los secadores que sean más adecuados para manejar el material mojado y el producto seco que se adapten a la continuidad del proceso como un todo y generen un producto de las propiedades físicas deseadas. Esta selección preliminar se puede realizar con la ayuda del cuadro 1 contenido

en el anexo A, que clasifica a los diversos tipos de secadores basándose en los materiales manipulados.

3.2.2. Comparación inicial de los secadores. Los secadores seleccionados de esta manera se evaluarán en forma aproximada, basándose en los datos de costo y funcionamiento. Partiendo de esta evaluación, los secadores que parezcan ser menos económicos o poco apropiados desde el punto de vista de su funcionamiento no se deberán someter a consideraciones subsecuentes.

3.2.3. Pruebas de desecación. Estas pruebas se deben llevar a cabo en los secadores que aún estén en estudio. Dichas pruebas determinarán las condiciones óptimas de operación y las características del producto, y constituirán la base para obtener cotizaciones de los distribuidores de este tipo de equipo.

3.2.4. Selección final del secador. Una vez que se hayan recopilado los resultados de las pruebas de desecación y las cotizaciones sobre los equipos, se hará la selección final del secador más apropiado para el caso. Los factores importantes que se deben tomar en cuenta para la selección preliminar de un secador son los siguientes:

1. Propiedades del material que se va a manejar

- a. Características físicas en mojado.
 - b. Características físicas en seco.
 - c. Corrosividad.
 - d. Toxicidad.
 - e. Inflamabilidad.
 - f. Tamaño de la partícula.
 - g. Abrasividad.
2. Características de desecación del material
- a. Tipo de humedad. (ocluida, no ocluida o ambas).
 - b. Contenido inicial de humedad.
 - c. Contenido final de humedad (máxima).
 - d. Temperatura permisible de desecación.
 - e. Tiempo probable de desecación para diferentes secadores.
3. Circulación del material que entra y sale del secador
- a. Cantidad que se va a tratar por hora.
 - b. Operación continua o por lotes.
 - c. Proceso anterior a la desecación.
 - d. Proceso subsecuente a la desecación.

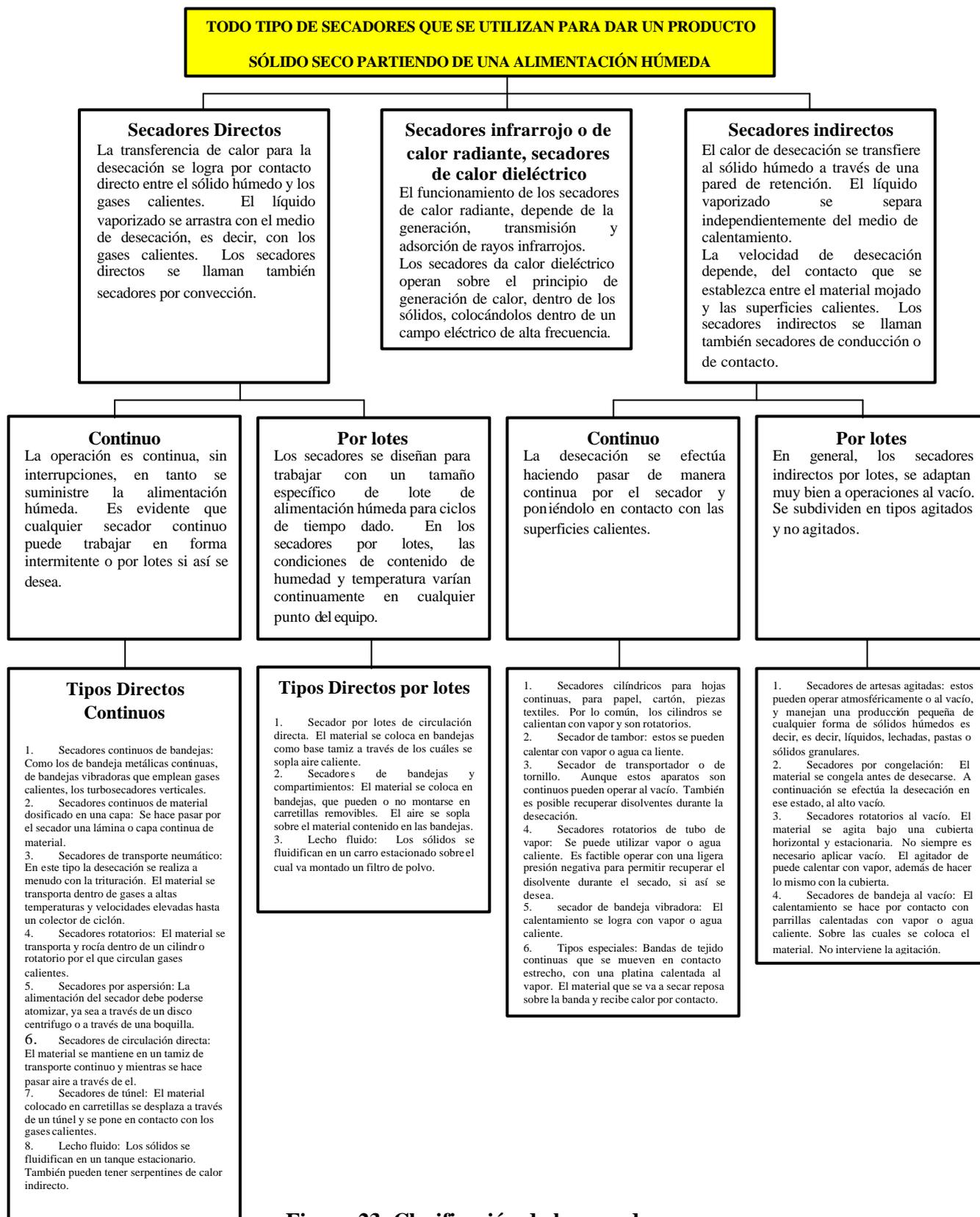


Figura 23. Clasificación de los secadores

4. Cualidades del producto

- a. Contracción.
- b. Contaminación.
- c. Uniformidad del contenido final de humedad.
- d. Descomposición del producto.
- e. Deseccación excesiva.
- f. Estado de subdivisión.
- g. Temperatura del producto.
- h. Densidad a granel.

5. Problemas de recuperación

- a. Recuperación de polvos.
- b. Recuperación de disolvente.

6. Instalaciones disponibles en el sitio de ubicación propuesto

- a. Espacio.
- b. Temperatura, humedad y limpieza del aire.
- c. Combustibles disponibles.
- d. Energía eléctrica disponible.
- e. Ruido, vibración, polvo o pérdidas de calor permisibles.
- f. Fuente de alimentación mojada.
- g. Salidas de gases de escape.

3.3. EQUIPOS COMUNES EN LA DESECACIÓN DE SÓLIDOS

Existen una gran variedad de equipos para la desecación de sólidos de los cuales, a continuación se hará referencia a los equipos más comunes:

1. Secador de parrillas al vacío

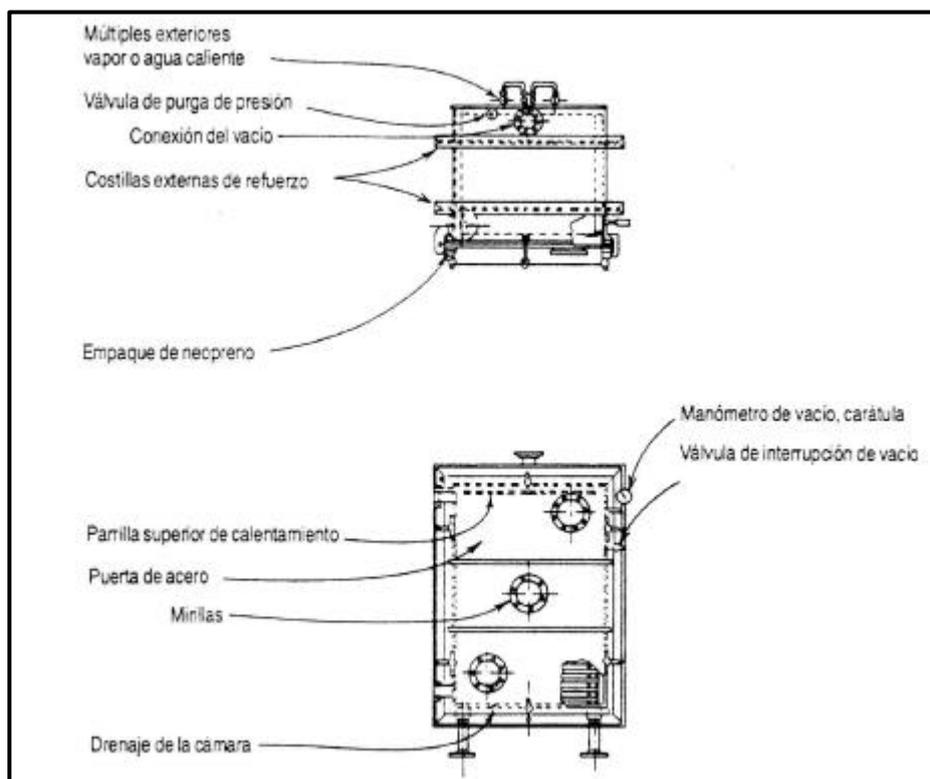


Figura 23. Secador de parrillas al vacío.

Es un secador de tipo por lote con calentamiento indirecto. El calor se transmite al material por conducción, a través de la parrilla y el fondo de la bandeja, y por radiación por la parrilla superior. Consta de una cámara hermética al vacío, construida casi siempre de hierro colado o placas de acero con parrillas de soporte calentados dentro de la cámara, una fuente de vacío y un condensador. El medio de calentamiento que penetra por un cabezal y pasa por las parrillas huecas hasta llegar al cabezal de salida, es por lo común vapor, cuya presión oscila alrededor de los 700 kPa manométricos. El material que se va a desecar se coloca en charolas o bandejas sobre las parrillas calentadas. En general las bandejas son metálicas para asegurar una buena transmisión de calor entre parrilla y bandeja.

2. Secadores de tubo bandeja

Es calentador continuo con calentamiento directo. Consta de una parrilla anulares rotatorias, en cuyo centro giran ventiladores de tipo turbina para hacer circular el aire por encima de las parrillas o repisas. El material húmedo penetra por la parte superior y cae sobre la parrilla más alta, conforme gira bajo la abertura de alimentación. Después de completar una revolución el material se lanza con un barredor por las rendijas radiales sobre la parrilla inferior, es don de se extienden un montón uniforme por medio de un nivelador estacionario. Esta acción se repite en cada parrilla y las transferencia ocurren una vez en cada revolución. Las partes que están en contacto con el producto deben ser de hacer o de aleaciones especiales.

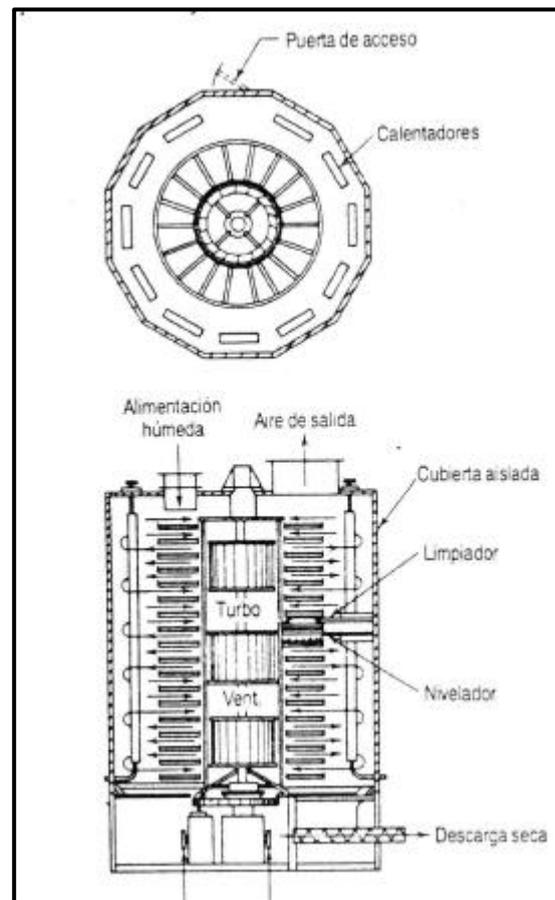


Figura 24. Secador de turbo bandejas

3. Secadores de túnel

Los túneles continuos son, en muchos casos, compartimientos por lotes de carretillas o bandejas operadas en serie. Los sólidos que se van a procesar, se colocan en bandejas o carretillas que se desplazan progresivamente a lo largo del túnel, en donde están en contacto con gases calientes. El funcionamiento es semi continuo y, cuando el túnel esta

lleno, una de las carretillas se extrae por el extremo de descarga, al mismo tiempo que se introduce otra por el extremo de admisión. En algunos casos las carretillas se desplazan sobre carriles o monorraíles, y usualmente se transportan por medios mecánicos usando propulsores de cadena conectados a la base de cada carretilla. La circulación del aire puede ser a contracorriente o paralela, o bien una combinación de estas dos formas, (ver fig. 25).

A demás, con frecuencia se emplean diseños de flujo transversal, en donde el aire de calentamiento circula en uno u otro sentido sobre las carretillas colocadas en serie. Se pueden instalar bobinas o serpentines de recalentamiento, después de cada paso de flujo transversal, con el fin de mantener una temperatura constante durante la operación. En cada etapa se instalan ventiladores de circulación del tipo de hélices grandes y el aire se introduce o se extrae en cualquier punto conveniente. Los equipos de túnel poseen la máxima flexibilidad para cualquier combinación de corriente de aire y escalonamiento de temperaturas. Cuando se trata de manejo de sólidos particulados granulados, que no ofrecen resistencia poderosa al flujo del aire, se emplean transportadores de banda perforados o tipos criba con circulación directa de gas, con objeto de mejorar las velocidades de transferencia de calor y masas.

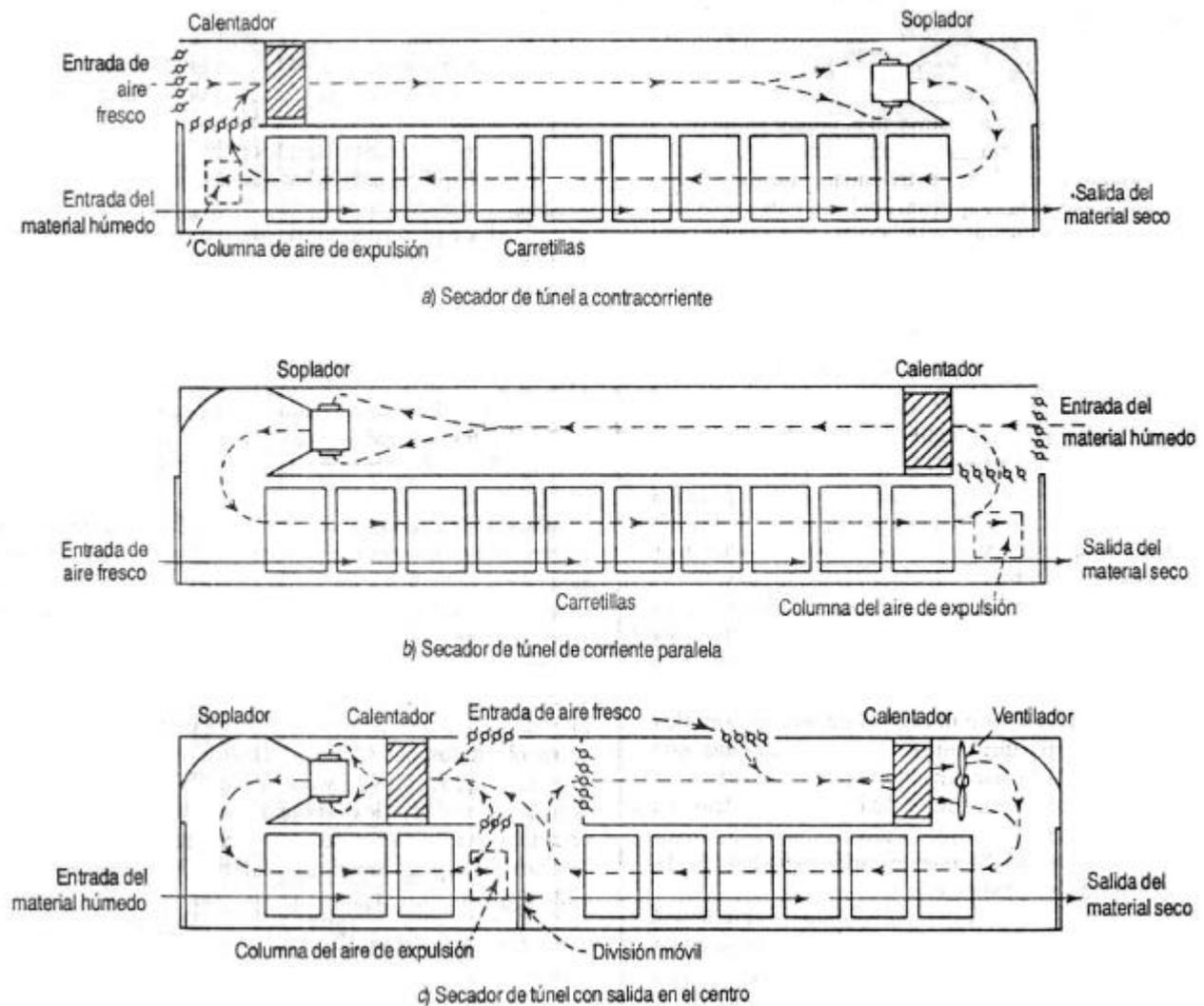


Figura 25. Secadores continuos de túnel

4. Secador rotatorio

El flujo a contracorriente del gas y los sólidos generan mayor eficiencia de transferencia de calor con una temperatura de gas de entrada determinada ; pero el flujo en corrientes paralela se usa con mayor frecuencia para desecar materiales sensibles al calor a

temperaturas de gas de entradas superiores, debido al rápido enfriamiento que sufre el gas durante la evaporación inicial de la humedad de la superficie.

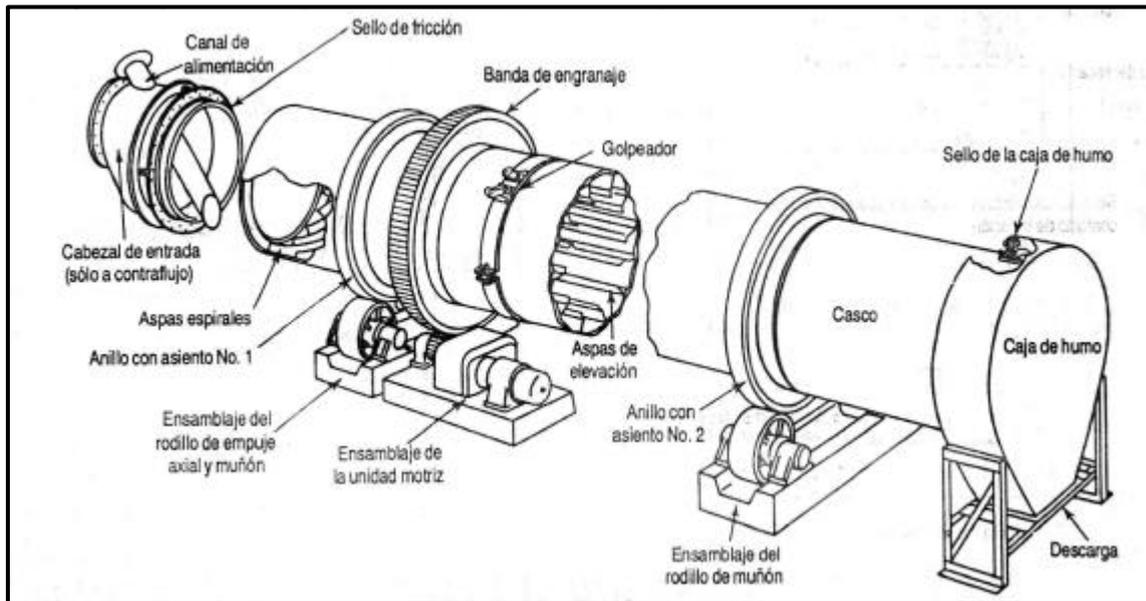


Figura 26. Configuración de los componentes de un secador rotatorio contracorriente

Hay varios métodos que se utilizan para sellar el cilindro rotatorio y evitar la fuga de gas por las aberturas anulares entre el cilindro rotatorio y las piezas estacionarias de la garganta. Ninguno de ellos es un sello de sólido eficaz, ni tampoco funcionará satisfactoriamente como sello de gas, si se permite la fuga de sólidos sobre el anillo de retención del cilindro.

En secadores rotatorios directos se encuentran muy pocos sellos de gas que sean totalmente herméticos; pero con el control minucioso de la presión interna que casi siempre oscila entre 0.25 y 2.5 mm de H₂O por debajo de la atmósfera, se evita la emanación de polvos al exterior y se reduce al mínimo la entrada de aire del exterior.

5. Secadores de correas sin fin

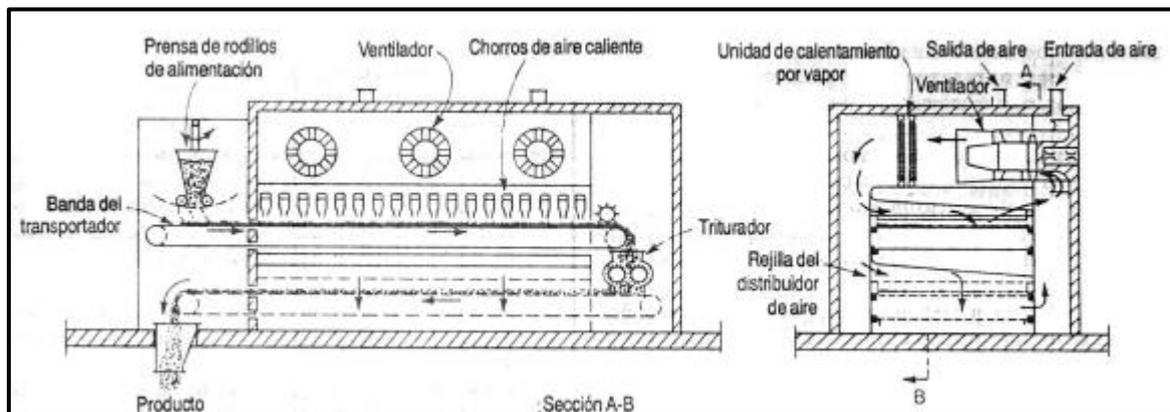


Figura 27. Secador de transportador continuo

En la figura 27, se muestra un secador de transportador continuo que utiliza una combinación de choque de aire y circulación directa. Funcionan de tal manera que estas unidades se calientan con gas, petróleo o electricidad y utilizan circulación directa de los gases de combustión o muflas para transmitir el calor. Los hornos continuos tienen con frecuencia una extensión adicional para enfriar la carga antes de exponerla al aire atmosférico.

Los transportadores pueden ser de cadenas paralelas, de emparrillado de franjas o tablillas, de banda de malla de alambre o del tipo de aleación fundida. Se emplean dispositivos automáticos para tensar, con objeto de mantener la tensión de banda durante el calentamiento y el enfriamiento. El producto puede descansar directamente sobre el transportador o sobre soportes de construcción especial, que se adapten al mismo.

6. Horno de hogar rotatorio

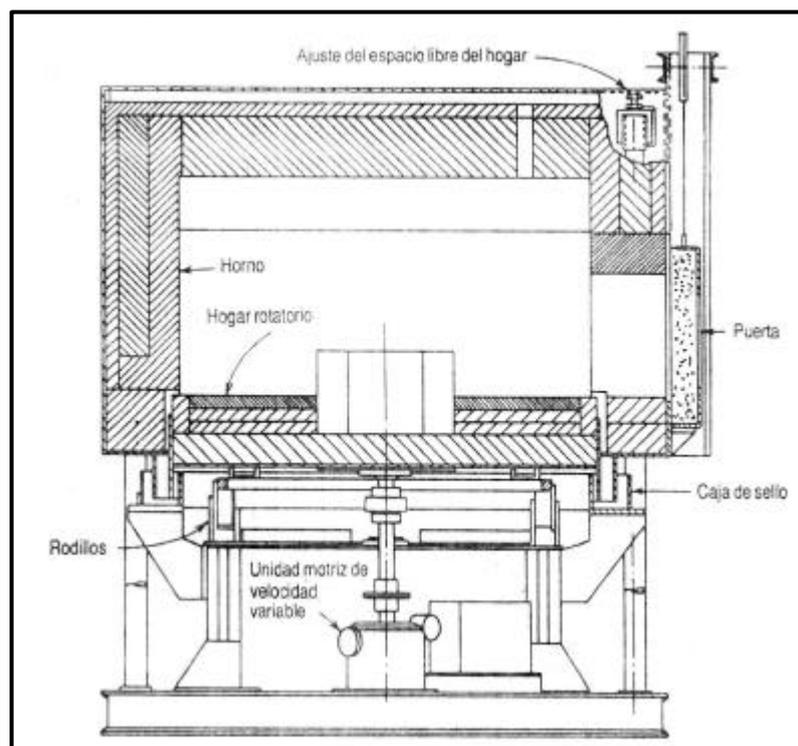


Figura 28. Horno de hogar rotatorio

Consta de una cámara de recalentamiento recubierta con ladrillos refractarios dentro de la cual se tiene un hogar rotatorio de forma anular, revestido con material refractario. Alrededor de la película del hogar rotatorio se utilizan sellos de líquido circulante o arena, para evitar la infiltración del aire. En estos hornos se realizan operaciones semicontinuas, y la velocidad del hogar se altera, para satisfacer los requisitos variables de tamaño, peso y carga de material. Cuando el calentamiento se hace con gas o petróleo los quemadores se encienden a los lados de la cámara en sentido tangencial al hogar.

Los hornos estándares son, casi siempre de fuego directo, en el sentido de que los gases de la combustión de los quemadores circulan directamente sobre la carga; en ocasiones se permiten que las llamas toquen la carga. Cuando se deben realizar trabajos que requieren la protección de la carga por medio de atmósferas especiales, como el templado brillante, el templado de herramientas, la sinterización de materiales en polvo, etc, casi siempre se emplean hornos tipo muflas.

3.4. SECADORES DE TRANSPORTE NEUMÁTICO

La operación para establecer contacto entre el gas y los sólidos en el cual la fase sólida existe en una condición diluida se denomina sistema neumático. Recibe este nombre por que, en la mayoría de los casos, la cantidad y la velocidad del gas son suficientes para

levantar y transportar los sólidos en contra de la fuerza de gravedad. Los sistemas neumáticos se distinguen por dos características.

1. La retención de una partícula determinada de sólidos en el sistema es, en promedio, muy breve, casi siempre con una duración no mayor de unos segundos. Esto significa que cualquier procesado realizado en un sistema neumático no se puede controlar por difusión. La reacción debe ser primordialmente un proceso de superficie, o bien las partículas de los sólidos deberán ser muy pequeñas para que la transferencia de calor y de masa desde los interiores sean fundamentalmente instantáneas.

Basándose en el aspecto del contenido de energía, el sistema está equilibrado en todo momento; dicho de otra manera, existe la suficiente energía en el gas (o los sólidos) presente en el sistema en cualquier instante determinado para completar el trabajo en todos los sólidos (o el gas) presentes en dicho instante. Esto es vital en el sentido de que no existe una demora de respuestas a los cambios de control para poner en marcha o detener el sistema; es decir, no es necesario retener entre corrida alguna cantidad residual de sólidos parcialmente procesados o de gas.

2. El equipo neumático es muy apropiado para procesar materiales sensibles al calor, fácilmente oxidables, explosivos o inflamables que no se puedan exponer durante largos períodos de tiempo a las condiciones del proceso. La circulación del gas y los sólidos, es por lo común de corriente paralela, aunque se encuentra una excepción en el secado por rocío de flujo a contracorriente.

Los transportadores son apropiados para materiales granulados y de movimiento libre cuando se encuentran dispersos en la corriente de gas, de manera que no se adhieran a las paredes del transportador ni se aglomeren. Los materiales pegajosos, como los conglomerados o tortas de filtros, se manejan en muchos casos dispersándolos y desecándolos parcialmente en un desintegrador con barrido de aire. El material grueso o áspero que contiene humedad interna se somete a una trituración fina en un molino de martillos.

Un transportador neumático consta de un ducto o conducto largo que lleva un gas con alta velocidad, un ventilador para impulsar dicho gas, un dosificador apropiado para agregar y dispersar los sólidos particulados en la corriente de gas y colector de ciclón u otro equipo de separación para la recolección final de los sólidos del gas.

Se pueden utilizar varias clases de alimentadores de sólidos, los de tornillo sin fin , secciones venturi, trituradores de alta velocidad y molinos de alta dispersión, etc. Para transportadores neumáticos, la elección del alimentador correcto, para asegurar una minuciosa dispersión inicial de los sólidos en el gas, constituye un factor de primordial importancia. Por ejemplo, si emplea un molino de martillos con barrido de aire en una operación de desecación, se puede transmitir del 65 al 95% del calor total dentro del molino mismo si todo el gas desecante se hace pasar por él. Los ventiladores pueden ser de tiro inducido o forzado. Casi siempre se desea utilizar el primero, por que el sistema puede ser operado con una leve presión negativa. El polvo y el gas caliente no escapan por fugas

del equipo. Se prefiere utilizar también separadores de ciclón para lograr una inversión menor. Si es obligatoria una recuperación máxima de polvo o humos perjudiciales, al ciclón debe seguir un lavador o depurador por vía húmeda, o bien un recolector de bolsa.

El requisito fundamental en todas las aplicaciones es que la operación se complete en forma instantánea; la difusión interna de la humedad no debe ser un factor limitante en la desecación, y los tamaños de partícula serán lo suficientemente pequeños para que la conductividad térmica de los sólidos no sea la que ejerza el control durante las operaciones de calentamiento o enfriamiento. Los transportadores neumáticos pueden contar con una o varias etapas. El primero sirve para evaporar cantidades pequeñas de humedad superficial. Las instalaciones de etapas múltiples se utilizan en procesos difíciles de desecación, por ejemplo, el desecado de productos sensibles al calor que tienen grandes cantidades de humedad y la desecación de materiales que contienen inicialmente humedad tanto interna como superficial

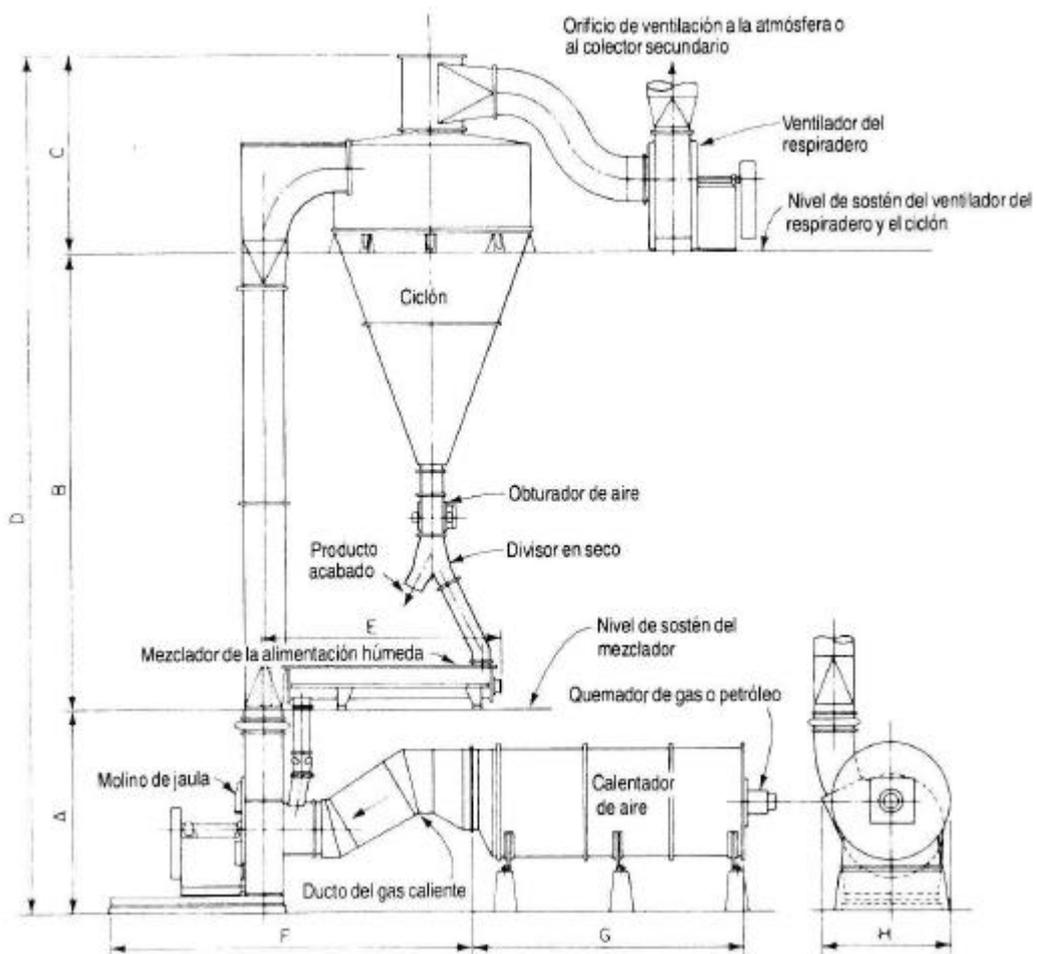


Figura 29 Secador de transportador neumático de una sola etapa. (*Raymond Division, Combustion Engineering Inc*)

4. DISEÑO

4.1. PRINCIPIOS DE DESECACIÓN

El desecado de sólidos se refiere generalmente a la separación de un líquido de un sólido, por evaporación.

En el equipo de contacto gas sólidos, los sólidos pueden estar en cualquiera de las cuatro condiciones siguientes.

Estático Este es un lecho denso de sólidos en el cual cada partícula descansa sobre otras, esencialmente a la densidad de masa de sedimentación de la fase sólida. Dicho de otra manera, no existe movimiento relativo entre las partículas sólidas.

Móvil Este es un equipo de lecho de sólidos ligeramente restringido en el cual las partículas están separadas apenas lo suficiente para fluir o deslizarse unas sobre otras. Por lo común el flujo es descendente por acción de la fuerza de gravedad; pero también se puede registrar un movimiento ascendente debido a la elevación mecánica o a la agitación,

generadas dentro del equipo de proceso. En algunos casos la elevación se logra en equipos independientes y estos fluyen en presencia de la fase gaseosa solo en sentido descendente.

Fluidificado Se trata de una condición menos restringida aun en la cual las partículas sólidas se sostienen por medio de fuerzas de arrastre provocadas por la fase gaseosa que pasa por los intersticios de las partículas, con velocidad crítica dada. Es una condición inestable, por que la velocidad superficial ascendente del gas es menor que la velocidad final de asentamiento o sedimentación de las partículas sólidas; la velocidad del gas no basta para arrastrar y transportar en forma continua todos los sólidos. Al mismo tiempo dentro de la corriente de gas se registran turbulencias con velocidades bastante grandes para elevar transitoriamente las partículas. El movimiento de éstas es repetidamente ascendente y descendente. En realidad, la fase de los sólidos y la fase gaseosa están entremezcladas y se comportan juntas como un fluido en ebullición.

Diluido Esta es una condición irrestricta en la cual las partículas sólidas están tan separadas entre sí que prácticamente no ejercen ninguna influencia unas en otras. La fase de los sólidos está tan dispersa dentro del gas que la densidad de la suspensión es fundamentalmente la de la fase gaseosa en lo individual. Esta situación se presenta cuando la velocidad del gas en todos los puntos del sistema sobrepasa la velocidad final de asentamiento de los sólidos, y las partículas ascienden y son arrastradas continuamente por el gas; no obstante no siempre este será el caso. En las cámaras de sedimentación por gravedad como las torres de granulación u los secadores por aspersión con flujo a

contracorriente, son dos excepciones en que la velocidad del gas es insuficiente para arrastrar por completo los sólidos.

El desecado o secado de sólidos se refiere generalmente a la separación de un líquido de un sólido, por evaporación.

A continuación se dan las definiciones generalmente aceptadas:

- a) **Humedad ocluida:** en un sólido es aquel líquido que ejerce una presión de vapor inferior a la del líquido puro, a una temperatura dada. El líquido puede quedar ocluido por retención en capilares diminutos, por solución en celdas o paredes fibrosas, por solución homogénea a lo largo del sólido y por adsorción química o física en las superficies del sólido.
- b) **Flujo capilar:** Es el paso de un líquido por los intersticios y la superficie provocado por la atracción molecular líquido sólido.
- c) **Contenido crítico de humedad:** Es el contenido de humedad promedio cuando concluye el periodo de velocidad constante.
- d) **Base de peso seco:** Es la expresión del contenido de humedad de sólidos mojados en kilogramos de agua por kilogramos de sólidos completamente secos.
- e) **Contenido de humedad de equilibrio:** Es la humedad limitante a la cual el material se debe desecar en condiciones específicas de contenido de temperatura y humedad del aire.
- f) **Material higroscópico:** Es aquel que puede contener humedad ocluida.

- g) ***Difusión interna***: Se define como el movimiento del líquido o el vapor a través de un sólido, como resultado de una diferencia de concentración.
- h) ***Gradiente de humedad*** : Se define como el contenido de agua dentro de un sólido en un momento de terminado dentro del proceso de desecación.
- i) ***Material no higroscópico***: es aquel que no contiene alguna humedad ocluida.

El desecado de sólidos incluye dos procesos fundamentales y simultáneos: primero se transmite calor para evaporar el líquido y segundo se transmite masa en forma de líquido o vapor dentro del sólido y como vapor desde la superficie. Los factores que regulan las velocidades de estos procesos determinan la rapidez o el índice de desecación.

El movimiento dentro del sólido se debe a un gradiente de concentración que depende de las características del mismo. Un sólido a desecar puede ser poroso o no poroso. También puede ser higroscópico o no higroscópico. Muchos sólidos caen entre estos dos extremos, pero comúnmente se considera que el sólido puede ser lo uno lo otro.

Un estudio de la forma como se deseca un sólido se puede basar en el mecanismo interno de flujo del líquido o en el efecto de las condiciones externas de temperatura, humedad, flujo de aire, estado de subdivisión, etc., en la velocidad de desecación del sólido. Aún cuando el segundo procedimiento es menos fundamental, generalmente es el más utilizado debido a que los resultados tienen una mayor aplicabilidad inmediata en el diseño y la evaluación de los equipos.

4.1.1. Mecanismo interno de la circulación del líquido. La estructura del sólido determina el mecanismo por el cual puede ocurrir la circulación o flujo interno del líquido. Estos mecanismos pueden incluir: 1) difusión en sólidos homogéneos y continuos, 2) flujo capilar en sólidos granulados y porosos, 3) flujo provocado por contracción y presión, 4) flujo producido por gravedad y 5) flujo provocado por la secuencia de vaporización y condensación.

Diversos autores² clasificaron los sólidos basándose en el flujo capilar y de difusión de la siguiente manera.

- Flujo capilar: La humedad contenida en los intersticios de los sólidos, como líquido en la superficie o como humedad libre en las cavidades celulares, se desplaza por gravedad y capilaridad, a condición de que existan pasadizos para un flujo continuo. En la desecación, el flujo de líquido debido a la capilaridad se aplica a líquidos que no están en solución y a toda humedad por encima del punto de saturación de fibra, como sucede en textiles, papel y pieles, y a toda humedad por encima del contenido de humedad de equilibrio a la saturación atmosférica, como sucede en polvos finos y sólidos granulares, como pigmentos de pintura, minerales y arcilla, suelos y arena.

- Difusión de vapor: La humedad se desplaza por acción de la difusión de vapor a través del sólido, a condición de que se establezca un gradiente de temperatura por calentamiento, creando así un gradiente de presión de vapor. La vaporización y la difusión de vapor

² Hougen, McCauley y Marshall; Trans. Am. Inst. Chem. Eng. 1940

ocurren en cualquier sólido en el cual se realice el calentamiento en una superficie y la desecación en la otra, y en donde el líquido quede aislado entre los gránulos del sólido.

- Difusión de líquidos: El movimiento de los líquidos por difusión en sólidos se restringe al contenido de humedad en equilibrio por debajo de los puntos de saturación atmosférica, y a sistemas en que la humedad y los sólidos son mutuamente solubles. El primer caso se aplica a las últimas etapas de desecación de arcillas, almidones, harinas, textiles, papel y madera; la segunda clase incluye el desecado de jabones, gomas, gelatinas y pastas.

Las variables externas comprendidas en cualquier estudio de desecación son temperatura, humedad, flujo de aire, estado de subdivisión del sólido, agitación del mismo, método de sustentación de este y el contacto entre las superficies calientes y los sólidos mojados.

4.2. PSICOMETRÍA.

El aire es una mezcla de gases, que cuando está seco tiene la siguiente composición:

Nitrógeno	: 78.03
Oxígeno	: 20.99
Argón	: 0.94
CO ₂	: 0.03
H, Xe, Kr	: 0.01

Para la mayoría de los cálculos, se puede considerar que aproximadamente el aire seco está constituido en volumen por 79% de nitrógeno, y 21% de oxígeno. Los correspondientes porcentajes en peso son de 77% de nitrógeno y 23% de oxígeno.

Otro constituyente importante del aire es el vapor de agua. Este vapor generalmente se tiene como vapor sobrecalentado como un gas invisible. Sin embargo, cuando el aire es enfriado a cierta temperatura (el llamado punto de rocío) el vapor de agua contenido en el aire empieza a condensarse y puede ser visible como neblina o llovizna, o como cuando se tiene condensación en una superficie fría (rocío). El contenido de vapor de agua que puede contener la atmósfera, se incrementa grandemente cuando la temperatura aumenta. A cualquier temperatura, la cantidad de vapor de agua puede variar prácticamente desde cero hasta la cantidad máxima que corresponda a dicha temperatura.

El vapor de agua contenido en el aire no sigue exactamente las leyes que gobiernan el comportamiento de los gases, pero pueden aplicarse con suficiente aproximación estas leyes para cálculos prácticos de psicometría.

4.2.1. Propiedades del vapor de agua. La ley de Gibbs-Dalton es aplicable para mezclas de vapor de agua-aire atmosférico. Esta ley establece: *En una mezcla dada de gases o vapores cada gas o vapor ejerce la misma presión que ejercería si estuviese solo en el mismo espacio y a la misma temperatura que tiene la mezcla.* En las mezclas gaseosas que

obedecen la ley de Gibbs-Dalton, hay una relación íntima entre las presiones parciales, porcentajes volumétricos y concentraciones moleculares.

Esto indica que en cualquier mezcla de gases, la presión total ejercida es igual a la suma de las presiones parciales ejercidas independientemente por cada uno de los gases constituyentes. El aire existe a una presión total que es igual a la presión barométrica (P_B), y esta presión es igual a la suma de las presiones parciales ejercidas por todos los gases, principalmente por el nitrógeno, p_{N_2} ; el oxígeno p_{O_2} ; y el vapor de agua, p_s ; o en términos matemáticos,

$$P_B = p_{N_2} + p_{O_2} + p_s \quad 2)$$

En esta ecuación, ya que no es necesario separar las presiones del nitrógeno y del oxígeno, es costumbre indicar la presión barométrica por la suma de la presión que corresponde al aire (p_a) y el correspondiente al vapor de agua (p_s). A la unión del nitrógeno y el oxígeno, frecuentemente se les llama “aire seco”, aire que ordinariamente está mezclado con vapor de agua.

La cantidad máxima de vapor de agua que pueda estar contenida en un espacio de un pie cúbico, depende de la temperatura, siendo independiente del peso y de la presión del aire que simultáneamente se tengan en el mismo espacio. Si para estas condiciones se atomizara en el espacio (aire) agua a la temperatura de saturación, esta agua permanecería como tal, posiblemente en la forma de llovizna o neblina, pero no se incrementaría el

contenido del vapor de agua en ese espacio (aire). Más aún, si se enfriara vapor saturado a su grado mínimo, sería imposible que se tuviera un aumento en la humedad del aire y el exceso de condensado se tendría en forma de neblina o de rocío. La presión de saturación será diferente y menor para un nuevo aire saturado de menor temperatura

Se conoce con el nombre de humedad a la mezcla de vapor de agua con aire seco en la atmósfera. Al peso de vapor de agua expresada en libras o granos, que se tienen en cada pie cúbico de espacio se le conoce como masa específica de vapor (d_s).

Se llama humedad específica al peso del vapor de agua, expresado en libras o granos, asociada con cada libra de aire-seco. Algunas veces se designa a la humedad específica por el término *relación de humedad*, también ha sido llamado "humedad" y "contenido de humedad", este término se designará con el símbolo W_s .

La humedad relativa se define como la relación de la presión parcial del vapor de agua contenido en el aire a la presión que ejerce el vapor de agua saturado a la temperatura del aire. Para temperaturas menores de 150°F, se tiene la siguiente definición equivalente a la que pudiera ser considerada como una definición más rigurosa: Humedad relativa es la relación de la masa específica del vapor de agua contenido en el aire a la masa específica del vapor de agua saturado a la temperatura del aire. Las dos definiciones son equivalentes para mezclas de vapor de agua que siguen exactamente la ley de los gases perfectos. En forma de ecuaciones, la humedad relativa aparece como

$$f = \left(\frac{P_s}{P_d} \right)_{t_d} \quad 3)$$

$$f = \left(\frac{d_s}{d_d} \right)_{t_d}$$

F = humedad relativa, expresada en forma decimal.

P_s = Presión parcial del vapor de agua contenido en el aire.

P_d = Presión del vapor saturado a la temperatura del aire (temperatura del bulbo seco, t_d).

D_s = masa específica del vapor de agua contenido en el aire, en libras por pie cúbico.

D_d = masa específica del vapor de agua saturada a la temperatura del aire (bulbo seco), en libras /ft³.

El vapor de agua contenido en el aire, esta en la condición de sobrecalentado para cualquier humedad relativa menor de 100%. A la temperatura de saturación correspondiente a la presión parcial del vapor de agua contenido en el aire, se le llama punto de rocío. Esto indica que el aire con humedad relativa menor de 100% puede ser enfriado hasta cierta temperatura que lo haga saturado, así se tendrá la mínima temperatura a la que pueda ser enfriado sin tener precipitación de su humedad (rocío). El punto de rocío también puede definirse como la temperatura a la cual el peso de vapor de agua asociado con cierto peso de aire es el adecuado para saturar dicho peso de aire.

Las temperaturas de punto de rocío, pueden leerse en instrumentos propiamente diseñados, pero es más común determinar la temperatura del punto de rocío indirectamente de las lecturas de las temperaturas del bulbo seco y de la temperatura del bulbo húmedo del aire.

La temperatura de bulbo seco del aire es la que se lee en un termómetro ordinario. Cuando la temperatura del aire se lee sin ninguna limitación, se considera siempre que es la temperatura del bulbo seco.

La temperatura de bulbo húmedo del aire, se obtiene cuando el bulbo de un termómetro es cubierto con un pabilo mojado con agua y éste es movido a través de un aire no saturado, el agua se evapora en proporción a la capacidad del aire para absorber la humedad. Esto hará que la temperatura indicada sea menor que la temperatura del bulbo seco, o temperatura del aire. Finalmente la temperatura de equilibrio obtenida es conocida como la temperatura de bulbo húmedo. El objeto de medir ambas temperaturas del aire, bulbo seco y bulbo húmedo es el determinar las características exactas de la humedad del aire, ya sea por cálculos o usando la llamada carta psicométrica.

Las propiedades termodinámicas del aire, agua y vapor de agua para diferentes temperaturas de bulbo seco, se obtienen en el anexo B.

4.3. CONSIDERACIONES DE DISEÑO

En el equipo de contacto gas-sólido, el sólido se encuentra en estado diluido, es decir, la fase de sólidos está tan dispersa dentro del gas que la densidad de la suspensión es fundamentalmente la de la fase gaseosa en la individual. Por lo común, esta situación se presenta cuando la velocidad del gas en todos los puntos sobrepasa la velocidad inicial de asentamiento de los sólidos, y las partículas ascienden y son arrastrados continuamente por el gas. Se deduce entonces que el contacto del gas con el sólido es por circulación directa, la trayectoria del gas y el sólido se realiza en corriente paralela.

Hasta ahora se ha publicado muy poca información y escasos datos de operación sobre secadores de transportador neumático que permitan establecer una base teórica, bien fundada para su diseño. Pero si debemos tener en cuenta ciertas consideraciones para hacer de este un diseño digno de toda credibilidad.

1. Según sea la sensibilidad del producto en relación con la temperatura, se utilizarán temperaturas de aire de entrada que oscilan probablemente entre 400 –1400 K (260 –2060 °F)
2. Cuando se tratan de sólidos sensibles al calor, un alto contenido inicial de humedad debe permitir el empleo de una temperatura más elevada del aire de entrada. La evaporación de la humedad superficial se lleva a cabo a la temperatura de bulbo húmedo del aire a la entrada del secador.

Durante el periodo de secado de velocidad constante el comportamiento de la humedad dentro del sólido es lo bastante rápido para mantener una condición saturada en la superficie y la velocidad de desecación se controla por medio de la velocidad de transmisión de calor a la superficie de evaporación.

El desecado se desarrolla por difusión de vapor desde la superficie saturada del material, pasando por una capa de aire estacionado que lo rodea.

Cuando el calor para evaporación durante el periodo de velocidad constante se suministra a través de un gas caliente, se establece un equilibrio dinámico entre la velocidad de transmisión de calor al material y la velocidad de eliminación de vapor desde la superficie. Este efecto, sugiere aumentar la temperatura del gas a la entrada, aún a una temperatura mayor a la de gelatinización, temperatura limitante en el proceso, ya que gracias al equilibrio dinámico de transferencia de masa y calor la temperatura alcanzada por el sólido en la evaporación es igual a la temperatura de bulbo húmedo.

3. La cantidad de aire necesario y la carga de sólidos a gas se filan de acuerdo con la carga de humedad, la temperatura del aire a la entrada y con frecuencia a la humedad del aire a la salida. (Si esta última es mayor a la que está en equilibrio con el producto, la carga de los sólidos deberá disminuir junto con la temperatura de entrada).

4. La velocidad del gas debe ser lo suficiente para transportar la partícula mas grande.

Dinámica de partículas³: Siempre que existe un movimiento relativo entre una partícula y el fluido que la rodea, este ejercerá un arrastre sobre la primera. fuerza de arrastre ejercida sobre la partícula está dado por:

$$F_d = \frac{CA_p U^2}{2g_c} \quad 3)$$

F_d : Fuerza de arrastre

C : Coeficiente de arrastre (adimensional)

A_p : Área proyectada de la partícula en la dirección del movimiento

g_c : Constante dimensional.

U : Velocidad relativa entre la partícula y el fluido.

Como es sabido cualquier partícula que queda bajo la acción de la gravedad se acelera hasta que la fuerza de arrastre se equilibre con la gravitacional, después de la cual seguirá cayendo a una velocidad constante conocida como velocidad terminal o de asentamiento libre U_t , expresado por:

$$u_t = \sqrt{\frac{2gm_p(\mathbf{r}_p - \mathbf{r})}{\mathbf{r}_p A_p C}} \quad 4)$$

Se ha encontrado que C es función de la forma de partícula y del número de Reynolds

$D_p U / \mu$

³ Sección 5. Manual del Ingeniero Químico de Perry

D_p : Diámetro de la partícula.

μ : Viscosidad del absoluta del fluido.

La observación de transportadores en funcionamiento indica, los sólidos rara vez se dispersan de un modo uniforme en la fase gaseosa.

Con muy pocas excepciones, las partículas se desplazan en un patrón laminar, siguiendo una línea aerodinámica a lo largo de la pared del ducto, en donde la velocidad del flujo es mínimo. Rara vez se experimenta una difusión completa e incluso parcial en la fase gaseosa.

Para el flujo de gases y sólidos por tubería horizontal y vertical, existen varias formas posibles, dependiendo de la densidad de los sólidos, la razón del índice de peso de sólidos a gas (carga) y la velocidad de este último. Cuando se trata de sólidos a baja densidad o índices bajos de sólidos a gas y altas velocidades de gas, los sólidos suelen estar completamente suspendidos y dispersos de una manera más o menos uniforme en la sección transversal de la tubería ; con razones reducidas de sólidos a gas y bajas velocidades de gas, los sólidos tienden a rebotar sobre la base de la tubería y formar dunas en donde las partículas van de duna en duna o bien, forman trozos, dependiendo de la naturaleza de las partículas .

Las velocidades del aire llegan a veces a valores de 20 a 30 m/s, pero este valor esta relacionado con la densidad a granel del sólido, como lo muestra el cuadro 3.

Cuadro 3. Velocidades del aire que se requiere para transportar sólidos de varias densidades de masa⁴

Densidad		Velocidad del aire		Densidad		Velocidad del aire	
Lb/ft ³	Kg/m ³	ft/min	m/min	Lb/ft ³	Kg/m ³	ft/min	m/min
10	160	2900	884	70	1120	7700	2347
15	240	3590	1094	75	1200	8000	2438
20	320	4120	1256	80	1280	8250	2515
25	400	4600	1402	85	1360	8500	2591
30	480	5050	1539	90	1440	8700	2652
35	560	5500	1676	95	1520	9000	2743
40	640	5840	1780	100	1600	9200	2804
45	720	6175	1882	105	1680	9450	2880
50	800	6500	1981	110	1760	9700	2957
55	880	6800	2072	115	1840	9900	3118
60	960	7150	2179	120	1920	10500	3200
65	1040	7450	2270				

Sin embargo, es de dudar que incluso los materiales más finos y ligeros alcancen más del 80% de esta velocidad, mientras que las fracciones más pesados y de mayor tamaño, hacen el recorrido con velocidades menores.

⁴ Manual del Ingeniero Químico de Perry, con autorización de flotronics División, Allied Industries.

5. Cálculo de longitud del secadero: Método basado en la transmisión de calor. En el funcionamiento de los secaderos continuos las condiciones del aire de secado (t , p , Y , G) y las del sólido varían a lo largo del secadero.

Un método para calcular la longitud de un secadero continuo circulando el gas y el sólido en corriente directa o en contracorriente consiste en el empleo de elementos de transmisión basado en la convección de calor y la longitud de la unidad de transmisión.

En la figura 30 se representa esquemáticamente un secadero adiabático continuo con un funcionamiento en contracorriente, en donde puede observarse que la temperatura del aire desciende de modo continuo desde la entrada hasta la salida del secadero, mientras que la del sólido asciende lentamente, se estabiliza en un valor constante, y finalmente vuelve a ascender. Se distinguen así tres zonas de secado:

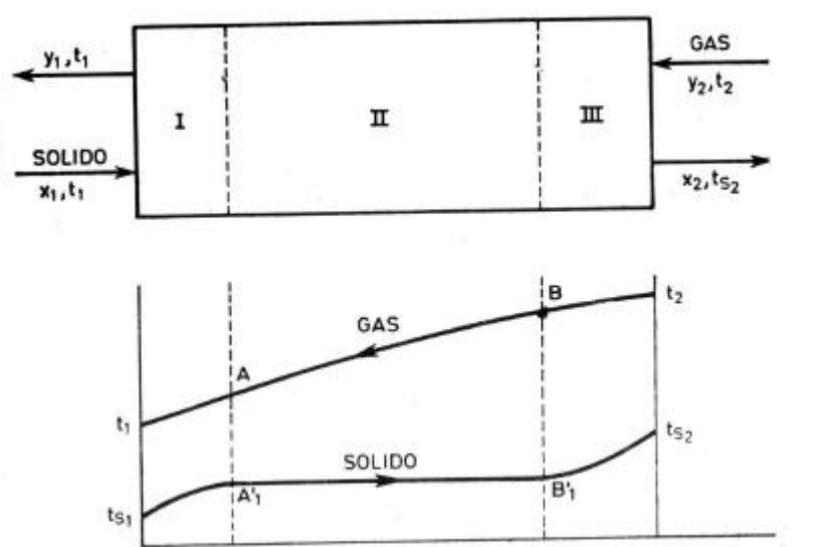


Figura 30. Representación esquemática de un secadero adiabático continuo con funcionamiento a contracorriente.

Zona 1 o de precalefacción, en la que los sólidos se calientan hasta la temperatura de saturación adiabática, no efectuándose secado en dicha zona.

Zona 2, en la que se separa prácticamente toda humedad del sólido, permaneciendo este a la temperatura de saturación adiabática.

Zona 3, en donde vuelve a elevarse la temperatura del sólido, sin variar prácticamente su humedad.

Al objeto de análisis del secadero podemos suponer que el secado se limita a la sección central, mientras que en los extremos tiene lugar solamente la transmisión de calor sin transporte de materia.

Hemos de indicar que en la zona II la temperatura de sólido se mantiene constante si recibe calor solamente del aire de secado. Esta zona constituye la zona más amplia en la mayoría de los secaderos, y en ella pueden estudiarse las variaciones de las condiciones del aire y del sólido sobre el diagrama psicrométrico. Sea *B* (figura 31) el punto representativo del aire a la entrada en esta zona ; si el secado se efectúa adiabáticamente (evaporándose el agua solamente a expensas del calor que recibe el aire), la variación de las temperatura y humedad del aire a su paso por esta zona vendrá dada por la línea de saturación adiabática *BA*, siendo *A* el punto representativo del aire a las salida de la zona.

Si el aire pierde calor al exterior, la variación de temperatura y humedad del aire vendrá dada por una línea tal como la BA_1 ; por el contrario, si el secadero recibe calor del exterior la línea representativa será una tal como BA_2 .

Para condiciones de funcionamiento ideal, es decir, cuando el calor recibido por el sólido procede exclusivamente del aire empleado para el secado y no hay intercambio de calor con el exterior*. Para un elemento de longitud del secadero dz un balance calorífico conduce a:

Calor recibido = Calor cedido por el gas

$$UdA(t - t_s) = UaA_n(t - t_s)dz = GA_n c dt' \quad 5)$$

Siendo A_n el área de sección transversal del secadero; a el área de contacto por unidad de volumen, dA/dz ; c el calor específico del gas, y dt' la disminución de la temperatura del gas. De la ecuación anterior resulta

Que admitiendo la constancia de Gc/Ua , da por integración

$$Z = Hot \times Not$$

Siendo Hot la altura del elemento de transmisión

* Es importante considerar el uso de aislantes térmicos, que garanticen al mínimo la interacción del sistema de transporte aire-sólido con el medio ambiente. En el anexo N se halla abundante información al respecto.

$$Hot = \frac{Gc}{Ua} \quad 6)$$

Y Not el número de elementos de transmisión:

$$Not = \int_1^2 \frac{dt'}{t - t_s} \quad 7)$$

Para la sección transversal del secadero (zona II), en la que la temperatura del sólidos constante e igual a la temperatura húmeda del aire, el número de elementos de transmisión será:

$$Not = \pm \ln \frac{t_B - t_w}{t_A - t_w} \quad 8)$$

El signo positivo corresponde al flujo en contracorriente y el negativo al flujo en corriente directa.

Para las secciones extremas del secadero, el número de elementos de transmisión puede calcularse por integración de la ecuación 7, cuando los perfiles de temperatura para las corrientes gaseosa y sólida son lineales; es decir, cuando las capacidades caloríficas de las corrientes respectivas son constantes. En estas condiciones $(N_{ot})_I$ y $(N_{ot})_{II}$ para secaderos de flujo en contracorriente vienen dados por

$$(Not)_I = \frac{t_A - t_1}{(t_1 - t_{s_1}) - (t_A - t_w)} \ln \frac{t_1 - t_{s_1}}{t_A - t_w} \quad 9)$$

$$(Not)_{II} = \frac{t_2 - t_B}{(t_B - t_w) - (t_2 - t_{s_1})} \ln \frac{t_B - t_w}{t_2 - t_{s_2}} \quad 10)$$

Las ecuaciones 8, 9 y 10 pueden ponerse en la forma

$$N_{OT} = \frac{\Delta t'}{(t - t_s)_{\log}} \quad 11)$$

Siendo $(t - t_s)_{\log}$ la media logarítmica de temperaturas entre el gas y el sólido, suponiendo que las temperaturas del gas y del sólido varían linealmente a lo largo de cada zona. Para aplicar esta ecuación han de considerarse por separado cada una de las tres zonas, evaluando las condiciones de entrada y salida del gas y del sólido en cada zona mediante balances de humedad y entalpía.

Para calcular la altura del elemento de transmisión hemos de aplicar la ecuación de definición. En el caso de secaderos de túnel, U puede calcularse de acuerdo con la ecuación 12 conduce a

$$H_{OT} = 57c G^{0.2} / a \quad 12)$$

Para los secaderos rotatorios el valor de U_a se calcula por la ecuación de Friedman y Marschall:

$$U_a = 57 G^{0.16} / d \quad 13)$$

En lo que

$$H_{OT} = 0.0175 G^{0.84} cd \quad 14)$$

Aplicable al intervalo de operación comprendido entre G de 100 y 50.000Kg/m².h.

El cálculo del diámetro del secadero puede efectuarse fácilmente una vez conocida la velocidad másica del aire, que ha de determinarse experimentalmente y ha de ser tanto menor cuanto más pequeño sea el tamaño de las partículas del sólido tratado para evitar su arrastre por el gas de secado. Conocida la velocidad másica del aire y el flujo de masa de aire, el diámetro vendrá dado por

$$d = \left(\frac{4W_G}{\rho G} \right)^{1/2} \quad 15)$$

Cuando se elimina una cantidad considerable de humedad superficial de sólidos y se desconocen las temperaturas de éstos, se obtendrá una aproximación aceptable de (ρ) en

la medida logarítmica entre las depresiones de bulbo húmedo del aire desecante en la entrada y la salida del desecador.

Si se supone que la eficiencia de contacto es del mismo orden que la que ofrecen los ascensores eficaces de un secador rotatorio y que las velocidades entre el gas y los sólidos es el factor de control se puede utilizar la ecuación:

Para fines de calculo, la sección transversal del transportador se fija de acuerdo con la velocidad del aire y cantidad supuesta.

$$A = \frac{m}{G} \quad 16)$$

El volumen y por ende, la longitud, se aplican, utilizando el método mencionado (punto 4) aplicando el método mencionado, utilizando la media logarítmica de la depresión de bulbo húmedo para la fuerza impulsora de la temperatura.

La caída de presión en el sistema se calcula aplicando la ecuación de Bernoulli.

Las piezas del transportador y el colector están perfectamente aislados para reducir las pérdidas de calor durante la desecación y otras operaciones de calentamiento.

4.4. CALCULO DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL SECADOR .

4.4.1. Nomenclatura

T_{1s}, T_{2s} : Temperatura de entrada y salida del sólido, °C.

X_1, X_2 : Humedad de entrada y de salida del sólido, en kg de agua por kg de sólido seco.

H_1, H_2 : Entalpía del sólido a la entrada y a la salida, Kcal./ Kg de sólido seco.

\dot{m}_s : Flujo másico del sólido, kg de sólido seco / hr.

ρ_s : Densidad a granel kg de sólido seco / m³.

C_s : Calor específico del sólido, Kcal. / Kg °C.

W_{a1}, W_{a2} : Contenido de agua en el sólido Kg de agua / Hr.

T_1, T_2 : Temperatura del aire a la entrada y la salida, °C.

Y_1, Y_2 : Humedad específica del aire a la entrada y la salida.

i_1, i_2 : Entalpía del aire a la entrada y la salida, Kcal / kg de aire seco.

\dot{m} : Flujo másico del aire, Kg de aire seco / hr.

ρ_a : Densidad del aire kg de aire seco / m³ de aire.

C_p : Calor específico del aire, Kcal / kg °C.

T_w : Temperatura del bulbo húmedo, °C.

Z : Longitud de la tubería del secador, m.

G : Velocidad másica del aire, Kg/ m² hr.

G_s : Velocidad másica del sólido, Kg / m² hr.

d : Diámetro del ducto, m.

- A : Área del ducto de secado, m².
- Q : Caudal del aire, m³/ min.
- V_a : Velocidad de arrastre del aire, m / min.
- V_r : Velocidad relativa entre el aire y el sólido, m / min.
- G_c : Constante gravitacional, m / s².
- C : Tonelada de almidón en base húmeda.
- R . Constante particular de los gases.

4.4.2. Balance de materia respecto al sólido

Base de calculo: 2 Ton almidón base húmeda (B.H.)

Porcentaje de humedad del almidón a la entrada (B.H.) = 45%

Porcentaje de humedad del almidón a la salida (B.H.) = 12%

La humedad en base seca del almidón, en función del porcentaje de humedad en base húmeda es:

$$X_i = \frac{\%_i}{1 - \%_i} \quad 17)$$

X₁ = 0.81 Kg agua / Kg de sólido base seca

X₂ = 0.136 Kg de agua / Kg de sólido base seca

•
m_s

Contenido de almidón base seca

$$\dot{m}_s = \frac{2 \text{ ton}}{\text{hr}} \times \frac{1000 \text{ kg}}{\text{ton}} \times 0.55 = 1100 \frac{\text{kg sólido}}{\text{hr}}$$

Contenido inicial de agua en el almidón

$$\dot{W}_1 = \frac{2 \text{ ton}}{\text{hr}} \times \frac{1000 \text{ kg}}{\text{ton}} \times 0.45 = 900 \frac{\text{kg agua}}{\text{hr}}$$

El contenido final de agua en el almidón, la obtenemos de la siguiente expresión:

$$\% \text{ Humedad} = \frac{W_2}{W_2 + \dot{m}_s} \quad 18)$$

Despejando a W_2 , y reemplazando el porcentaje de humedad en base húmeda a la salida del secador igual a un 12%, tenemos que:

$$W_2 = 150 \text{ kg agua / hr.}$$

El contenido de agua a retirar, $? W$ viene dada por:

$$\Delta W = W_1 - W_2 \quad 19)$$

$$? W = 750 \text{ kg de agua / hr}$$

$$T_{1s} = 30^{\circ}\text{C}$$

$T_{2s} < 65^{\circ}\text{C}$, entonces, asumimos un valor $T_{2s} = 60^{\circ}\text{C}$

El municipio de Sahagun, en el departamento de Córdoba, posee unas condiciones climatológicas típicas, las que son de mucha importancia para el diseño del secador, estas son:

$$T_{\text{prom}} = 26^{\circ}\text{C}$$

Humedad relativa ($F = 88\%$)

Humedad específica $Y_{\text{amb}} = 0.023$ Kg de agua / kg de aire seco

Estos datos son suministrados por el IDEAM*. Ver anexo C

Seguido del proceso de calentamiento del aire, asumimos una temperatura del aire a la entrada del secador (T_1)

$$T_1 = 120^{\circ}\text{C} \text{ (asumido).}$$

Consideramos el contenido de agua por kg de aire seco, en el proceso de calentamiento en el quemador, no altera la humedad específica del aire. Con estas consideraciones practicas, las condiciones del aire a la entrada del secador son.

* Instituto de Hidrología, meteorología y estudios ambientales

$Y_1 = 0.023$ kg de agua / kg de aire seco

$T_1 = 120$ °C.

Teniendo en cuenta la consideración del numeral 5, de la sección 4.3, determinamos mediante la carta psicrométrica (ver anexo D) , la temperatura T_w .

$T_w = 42.77$ °C



Figura 31. Esquema del secador de transporte neumático.

Partiendo de la ecuación para el calculo de el número de elementos de transmisión de calor, tenemos

$$N_{OT} = \pm \ln \frac{T_2 - T_w}{T_1 - T_w} \quad 20)$$

despejando a T_2 tenemos.

$$T_2 = T_w + \frac{T_1 - T_w}{e^{not}} \quad 21)$$

Si $N_{ot} = 1$, resolviendo tenemos que

$$T_2 = 72 \text{ }^\circ\text{C}$$

4.4.3. Balance de materia y calor en el secador

Balance de materia

$$X_1 \dot{m}_s + Y_1 \dot{m} = X_2 \dot{m}_s + Y_2 \dot{m} \quad 22)$$

reemplazando valores y despejando a Y_2

$$\dot{m}_s = 1100 \text{ kg de s\u00f3lido seco / hr.}$$

$$X_1 = 0.81 \text{ kg de agua / kg de s\u00f3lido seco}$$

$$X_2 = 0.136 \text{ kg de agua / kg de s\u00f3lido seco}$$

$$Y_1 = 0.023 \text{ kg de agua / kg de s\u00f3lido seco}$$

$$Y_2 = \frac{741.4 + 0.0223 \dot{m}}{\dot{m}} \quad 23)$$

Balance de calor

$$H_1 \dot{m}_s + \dot{i}_1 \dot{m} = H_2 \dot{m}_s + \dot{i}_2 \dot{m} \quad (24)$$

La entalpía de la mezcla de aire vapor de agua, viene dada por la expresión

$$\dot{i}_1 = (0.24 + 0.46Y)t + 597.2Y \quad (25)$$

Para una temperatura a la entrada de 120°C y $Y_1 = 0.023$ kg de agua / kg de aire seco

$$\dot{i}_1 = 43.8 \text{ kcal / kg}$$

a una temperatura del aire $T_2 = 72^\circ\text{C}$

$$\dot{i}_2 = 17.28 + 630.32Y_2 \quad (26)$$

La entalpía del sólido H, viene dada por la siguiente expresión

$$H = (C_s + XC_1)t_s \quad (27)$$

donde C_s : Calor específico del sólido

C_l : Calor específico del líquido

C_s : Calor específico del almidón según la relación de koop⁵

$c_s = 0.34 \text{ kcal / kg de agua } ^\circ\text{C}$

$C_l = 1 \text{ kcal / kg}$

Reemplazando C_s y C_l , a una temperatura $t_{s1} = 30^\circ\text{C}$, $t_{s2} = 60^\circ\text{C}$, en la ecuación

$$H_1 = 34.5 \text{ Kcal / kg}$$

$$H_2 = 28.56 \text{ Kcal / kg}$$

Despejando i_2 de la ecuación 23), y reemplazando los valores tenemos

$$i_2 = \frac{6534 + 43.8 \dot{m}}{\dot{m}} \quad 28)$$

e igualando con ecuación 25), tenemos

$$Y_2 = \frac{6534 - 26.52 \dot{m}}{630.32 \dot{m}} \quad 29)$$

⁵ Manual del Ingeniero Mecánico Marks vol I 2^{da} ed en español
pag4-10

Resolviendo las ecuaciones 22). y 29)

$$\dot{m} = 11233 \text{ kg de aire seco / hr}$$

reemplazando en la ecuación 23), se halla:

$$Y_2 = 0.088 \text{ kg de agua / kg de aire seco}$$

La cantidad de agua a extraer por cada kg de aire seco, viene dada por un delta de Y (ΔY).

$$\Delta Y = 0.057 \text{ kg agua / kg de aire seco}$$

El calor requerido para realizar el proceso de secado, se obtiene de realizar el siguiente balance de calor.

Q_T = calor necesario para llevar el producto hasta la temperatura de descarga + calor necesario para retirar la humedad

$$Q_T = Q_r C_p (T_1 - T_2) \quad [Kcal] \quad 30)$$

Calor necesario para eliminar la humedad. Q_v

$$Q_1 = \Delta w. [(t_w - t_{ls}) + 569.9 + 0.45(t_2 - t_w)] \quad 31)$$

$$? = 569.9 \text{ kcal / kg de agua}$$

$$?w = 750 \text{ kg de agua}$$

$$t_2 = 72 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$t_w = 42.77 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$t_{1s} = 30 \text{ }^\circ\text{C}$$

Reemplazando obtenemos

$$Q_1 = 446867 \text{ kcal / hr}$$

Calor necesario para llevar hasta la temperatura de descarga el producto

1

$$Q_2 = m_s \cdot C_s (t_{2s} - t_{1s}) + w_2 \cdot C_{\text{agua}} (t_{2s} - t_{1s}) \quad [\text{kcal}] \quad 32)$$

$$\dot{m}_s = 1100 \text{ kg de sólido seco / hr}$$

$$C_s = 0.34 \text{ kcal / kg }^\circ\text{C}$$

$$C_{\text{agua}} = 1 \text{ kcal / kg }^\circ\text{C}$$

$$T_{2s} = 65^\circ\text{C}$$

$$t_{1s} = 30 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$w_2 = 150 \text{ kg de agua / hr}$$

reemplazando valores en la ecuación 32) tenemos que:

$$Q_2 = 15720 \text{ kcal / hr}$$

$$Q_T = Q_1 + Q_2 \quad 33)$$

Reemplazando en la ecuación 33), tenemos:

$$Q_T = 462587 \text{ kcal / hr}$$

Despejando T_1 de la ecuación

$$T_1 = T_2 + \frac{Q_T}{m_s r C_p} \quad 34)$$

El calor específico de la mezcla aire más vapor de agua, viene dada por la expresión:

$$C_p = 0.24 + 0.46Y \quad 35)$$

$Y_2 = 0.136 \text{ kg de agua / kg de aire seco}$

$$C_p = 0.3025 \text{ kcal / kg } ^\circ\text{C}$$

? $72^\circ\text{C} = 0.9 \text{ kg / m}^3$

$T_2 = 72^\circ\text{C}$

Reemplazando estos valores en la ecuación 34), obtenemos

$$T_1 = 237.06 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$237.06^\circ\text{C} > 120^\circ\text{C}$$

La temperatura máxima de secado (T_w) es igual a 60°C , utilizando la carta psicométrica y la humedad específica del aire a la entrada del secador $Y_1 = 0.023 \text{ kg de agua / kg de aire seco}$, siguiendo una trayectoria adiabática, obtenemos la temperatura de bulbo seco a la entrada del secador $T_1 = 326 \text{ }^\circ\text{C}$.

La temperatura del aire a la salida del secador, se obtiene a través de la ecuación 21), sustituyendo en esta, se tiene:

$$T_2 = 158^\circ\text{C}$$

Para las nuevas condiciones de operación, se desarrollan los balances de materia y de calor en el secador

$$Y_2 = 0.086 \text{ kg de agua / kg de aire seco}$$

$$\dot{m} = 11702 \text{ kg aire seco / hr}$$

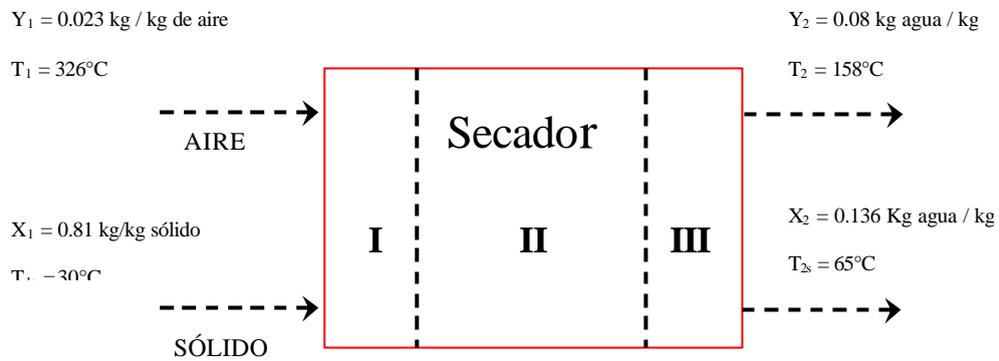


Figura 32. Esquema de operación del secador neumático

Las nuevas condiciones de operación

$$T_{1s} = 30^\circ\text{C}$$

$$T_{2s} = 65^\circ\text{C}$$

$$T_1 = 326^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 158^\circ\text{C}$$

$$Y_1 = 0.023 \text{ kg de agua / kg}$$

$$Y_2 = 0.086 \text{ kg de agua / kg}$$

$$X_1 = 0.81 \text{ kg de agua / kg de sólido seco}$$

$$X_2 = 0.136 \text{ kg de agua / kg de sólido seco}$$

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

Calculo del calor total del sistema para estas nuevas condiciones de operación

De la ecuación 30)

$$Q_1 = \Delta w \cdot [(t_w - t_{1s}) + 569.9 + 0.45(t_2 - t_w)] \quad (30')$$

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

$$T_2 = 158 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$? w = 750 \text{ kg de agua / hr}$$

$$Q_1 = 483000 \text{ kcal / hr}$$

De la ecuación 31)

$$Q_2 = \dot{m}_s C_s (t_{2s} - t_{1s}) + w_2 \cdot C_{\text{agua}} (t_{2s} - t_{1s}) \quad [\text{kcal}] \quad (31')$$

para:

$$T_{2s} = 65 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{1s} = 30 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$C_{\text{agua}} = 1 \text{ kcal / kg } ^\circ\text{C}$$

$$w_2 = 150 \text{ kg de agua / hr}$$

$$\dot{m}_s = 1100 \text{ kg de sólido seco / hr}$$

$$Q_2 = 18340 \text{ kcal / hr}$$

Sustituyendo los valores

$$Q_T = Q_1 + Q_2$$

$$Q_T = 501340 \text{ kcal / hr}$$

4.5. CALCULO DE LAS DIMENSIONES DEL DUCTO SECADOR

Sea Q_p : Calor necesario para recalentar el sólido mojado desde la temperatura de entrada hasta la temperatura de bulbo húmedo (T_w).

Q_c : Calor necesario par calentar el producto desde T_w hasta la temperatura de descarga .

Q_v : Calor necesario para evaporar el agua a la temperatura T_w .

4.5.1. Periodo de precalentamiento.

$$Q_p = \dot{m}_s C_s (t_w - t_{1s}) + w_1 C_{agua} (t_w - t_{1s}) \quad 36)$$

Se sustituyen los valores respectivos en la ecuación 36), se obtiene

$$Q_p = 39720 \text{ kcal / hr}$$

4.5.1.1. Cambio en la temperatura del aire

$$\Delta T_p = \left(\frac{Q_p}{Q_T} \right) (T_1 - T_2) \quad (37)$$

Para:

$$Q_p = 39720 \text{ kcal / hr}$$

$$Q_T = 501340 \text{ kcal / hr}$$

$$? T = (T_1 - T_2) = 168 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$? T_p = 11.4 \text{ }^\circ\text{C}$$

Temperatura final del aire en el periodo de precalentamiento

$$(T_f)_p = 326 - 11.4 = 314^\circ\text{C}$$

4.5.2. Periodo de calentamiento

$$Q_C = \dot{m}_s C_s (T_{2s} - T_w) + w_2 C_{agua} (T_{2s} - T_w) \quad (38)$$

Se sustituyen los valores correspondientes en la ecuación 38) y se obtiene

$$Q_c = 2620 \text{ kcal / kg}$$

4.5.2.1. Cambio en la temperatura del aire

$$\Delta T_c = \left(\frac{Q_c}{Q_T} \right) (T_1 - T_2) \quad 39)$$

Para:

$$Q_c = 2620 \text{ kcal / kg}$$

$$Q_T = 501340 \text{ kcal / hr}$$

$$\Delta T = (T_1 - T_2) = 168 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta T = 0.87 \text{ }^\circ\text{C} \sim 1 \text{ }^\circ\text{C}$$

Temperatura a la entrada del periodo de calentamiento

$$T_{ic} = 158 + 1 = 159 \text{ }^\circ\text{C}$$

4.5.3. Periodo de evaporación

$$Q_v = Q_t - (Q_c + Q_p) \quad 40)$$

$$Q_T = 581340 \text{ kcal / hr}$$

$$Q_c = 2620 \text{ kcal / kg}$$

$$Q_p = 39720 \text{ kcal / hr}$$

sustituyendo

$$Q_v = 459000 \text{ kcal / hr}$$

4.5.3.1. Cambio de temperatura del aire

$$\Delta T_v = \left(\frac{Q_v}{Q_T} \right) (T_1 - T_2) \quad 41)$$

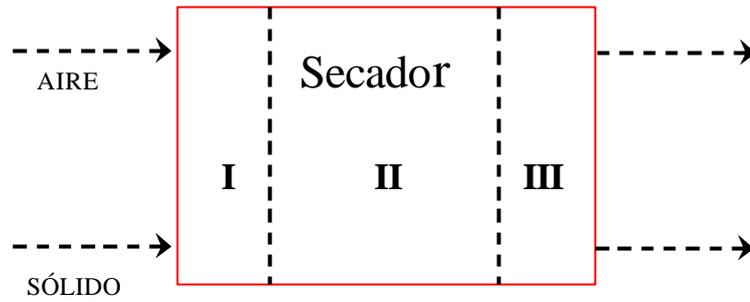
$$Q_v = 2620 \text{ kcal / kg}$$

$$Q_T = 581340 \text{ kcal / hr}$$

$$? T = (T_1 - T_2) = 168 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$? T_v = 153 \text{ }^\circ\text{C}$$

4.5.4. Diferencia media de temperatura



4.5.4.1. Zona I

$$? T_1 = 326 - 30 = 296 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$? T_2 = 314 - 60 = 254 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$(D_m)_I = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} \quad 42)$$

Sustituyendo estos valores, en la ecuación 42), se obtiene:

$$(D_m)_I = 275 \text{ } ^\circ\text{C}$$

4.5.4.2. Zona II

$$? T_1 = 314 - 60 = 254 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$? T_2 = 159 - 60 = 99 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Sustituyendo estos valores, en la ecuación 42), se obtiene:

$$(D_m)_{II} = 165 \text{ } ^\circ\text{C}$$

4.5.4.3. Zona III

$$? T_1 = 159 - 60 = 99 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$? T_2 = 158 - 65 = 93 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Sustituyendo estos valores, en la ecuación 42), se obtiene:

$$(D_m)_{III} = 96^\circ\text{C}$$

La diferencia media de temperatura para el secadero puede calcularse suponiendo que U_a es constante a lo largo del mismo por medio de la siguiente ecuación.

$$\left(\frac{1}{\Delta T_m} \right) = \left(\frac{Q_P}{Q_T} \right) \left(\frac{1}{\Delta T_P} \right) + \left(\frac{Q_V}{Q_T} \right) \left(\frac{1}{\Delta T_V} \right) + \left(\frac{Q_C}{Q_T} \right) \left(\frac{1}{\Delta T_C} \right) \quad 43)$$

Sustituyendo los valores obtenidos anteriormente para la diferencia media de temperatura parciales de las zonas I, II, III, tenemos que:

$$? T_m = 169.4 \text{ } ^\circ\text{C} \sim 170^\circ\text{C}$$

4.5.5. Dimensiones del secador

Una de las maneras como se puede calcular el tamaño, para fines de estimación, consiste en aplicar el concepto de la transferencia volumétrica de calor, como se hace en los secadores rotatorios.

$$Q_T = U_a (\Delta T)_m SZ \quad 44)$$

Q_T : Calor total suministrado al sistema

U_a : Coeficiente volumétrico de calor

S : Área transversal de la tubería

Z : Longitud real de la tubería

$? T_m$: Diferencia media de temperatura

donde,

$$U_a = \frac{38G^{0.16}}{d} \quad 45)$$

G : Gasto másico del producto, kg / m² °C (lb / ft² °F)

d : Diámetro de la tubería, m (ft)

El gasto másico del producto G , viene dada por la siguiente expresión

$$G = r_{a2} V_R \quad 46)$$

donde:

r_{a2} = densidad del aire a la salida del secador

V_R = Velocidad relativa entre el gas desecante y el sólido

Para una temperatura de 168°C, el aire posee una densidad de 0.84 Kg / m³, carta psicométrica en el anexo D.

La velocidad relativa del aire, esta en función de la velocidad de arrastre. El cuadro 3, la velocidad mínima de arrastre se expresa en función a la densidad a granel del sólido.

La densidad del almidón a granel es de 96 lb / in² ~ 1541 kg / m³*

Para este valor la velocidad mínima de arrastre es aproximadamente igual a:

$$V_a = 2743 \text{ m / min.}$$

Se aplica un factor de 1.5 para prever partículas con tamaño mas grande al tamaño promedio (76 Dm. , malla 200 B. S. Mesh)

$$V_a' = 4114.5 \text{ m/ min.} = 246870 \text{ m / hr}$$

La velocidad del gas debe ser lo suficiente para transportar la partícula mas grande. Sin embargo, es de dudar que incluso los materiales más finos y ligeros alcancen más del 80% de esta velocidad, mientras que las fracciones más pesados y de mayor tamaño, hacen el recorrido con velocidades menores.

$$V_R = V_a - V_s = V_a - 0.8V_a = 0.2V_a \quad 47)$$

$$V_R = 49374 \text{ m / hr}$$

Sustituyendo el valor de la velocidad relativa y la densidad del aire a la salida, en la ecuación 46), se obtiene:

$$G = 41474.16 \text{ kg / m}^2 \cdot \text{hr}$$

El valor del área transversal del ducto transportador, viene dada por la siguiente expresión:

$$S = \frac{\dot{m}}{G} \quad (48)$$

Sustituyendo los valores obtenidos, se tiene:

$$S = 0.28 \text{ m}^2$$

El valor del diámetro de la tubería, se calcula por medio de la ecuación 49).

$$d = \sqrt{\frac{4}{\rho} \left(\frac{\dot{m}}{G} \right)} \quad (49)$$

$$d = 0.599 \sim 0.6 \text{ m}$$

Sustituyendo en la ecuación 45) , se obtiene el coeficiente volumétrico de calor:

$$U_a = 347.11 \text{ kcal / h. m}^3 \cdot ^\circ\text{C}$$

Despejando el valor de Z, de la ecuación 44), resulta la siguiente expresión

$$Z = \frac{Q_T}{U_a \cdot \Delta T_m \cdot S} \quad 50)$$

donde:

$$Q_T = 501340 \text{ kcal / hr}$$

$$U_a = 347.11 \text{ kcal / h. m}^3 \cdot ^\circ\text{C}$$

$$? T_m = 170^\circ\text{C}$$

$$S = 0.28 \text{ m}^2$$

Sustituyendo, en la ecuación 50)

$$Z = 30.34 \text{ m} \sim 30 \text{ m}$$

4.6. CALCULO DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL QUEMADOR

Una reacción de combustión es aquella que incluye un combustible y un oxidante, y liberación de energía.

El combustible a utilizar en la generación de calor es el Metano (CH_4), el oxidante es aire, y el dióxido de carbono (CO_2) y el agua (H_2O)_g son los productos primarios.

La combustión completa requiere la presencia del oxígeno suficiente para que todo el carbono y el hidrógeno del combustible se conviertan en CO_2 y H_2O . Durante una combustión incompleta parecerán otros productos, el más importante de los cuales será el monóxido de carbono (CO).

La quema de los combustibles en la práctica industrial por lo general se lleva a cabo empleando aire como oxidante. Se considera que los componentes principales del aire son aproximadamente, 21% O_2 , 78% N_2 y 1% Ar, en volumen.

Por supuesto, también se encuentran presentes pequeñas cantidades de dióxido de carbono y otros gases. Es conveniente creer que el aire está compuesto por 21% de oxígeno y 79% de nitrógeno, en volumen. Esto quiere decir que se supondrá que hay 21 moles de oxígeno, por cada 79 moles de nitrógeno en el aire atmosférico.



La masa molecular promedio del aire es de 28.97, que en la mayor parte de los cálculos tomaremos como 29.

Cuando se utiliza aire como fuente de oxígeno, la mayor fracción de la fuente de oxidante es nitrógeno diatómico (N_2). El nitrógeno es en general un elemento estable que no reacciona químicamente con las demás sustancias presentes, a temperaturas normales, a las

temperaturas que se producen en una llama caliente, el nitrógeno si reacciona con el oxígeno para formar óxido de nitrógeno (NO) y dióxido de nitrógeno (NO₂)

La ecuación estequiométrica para la combustión del metano con aire es:



Para la combustión completa de carbono e hidrógeno y su conversión en CO₂ y H₂O, se pueden emplear los términos de requerimiento teórico, estequiométrico o químicamente correcto de oxígeno o aire. Si en un proceso no se usa esta cantidad, se habla entonces del porcentaje teórico de oxígeno o aire empleado realmente. La cantidad estequiométrica es el 100%, mientras que un exceso de oxígeno o aire significa que se ha empleado un valor superior al 100% teórico. Así, un 200% teórico de aire significa que se está suministrando una cantidad de aire que es el doble que se requiere para una combustión completa.

La ecuación estequiométrica de la combustión del metano (CH₄) y el aire a un 15% porcentaje en exceso es:



La relación de aire combustible (AC) se define como la masa de aire proporcionada por unidad de masa de combustible suministrado. La ecuación química muestra que se necesitan 10.948 moles de aire (2.3 moles O₂ + 8.648 moles N₂) por mol de combustible.

En consecuencia la relación de aire y combustible para la quema teórica de este combustible es:

$$AC = \frac{10.948 \text{ kg mol aire}}{\text{kg mol CH}_4} \times \frac{29 \text{ kg aire}}{1 \text{ kg mol aire}} \times \frac{1 \text{ kg mol CH}_4}{16 \text{ kg CH}_4}$$

$$AC = 19.84 \text{ kg aire / kg CH}_4$$

4.6.1. Entalpía de formación de una sustancia pura (h_f). En ingeniería, los estudios de los sistemas reactivos se dirigen por lo general a los procesos de flujo y estados estacionarios.

Para un sistema simple y comprensible la primera ley es, en este caso,

$$Q + W_{eje} = \Delta H + \Delta EC + \Delta EP$$

Para un sistema químicamente reactivo, el término ΔH de esta última expresión se puede escribir como

$$\begin{aligned} \Delta H &= H_{prod} - H_{reac} \\ \Delta H &= \sum_i (N_i h_i)_{prod} - \sum_i (N_i h_i)_{reac} \end{aligned} \quad 51)$$

donde h_i es la entalpía molar de cualquier producto o reactivo a la temperatura y presión de la reacción, y N_i es el número de moles de cualquier producto o reactivo. La evaluación de las cantidades h_i en la ecuación 36 introduce una ***dificultad única*** de los sistemas reactivos.

En el anexo se encuentran varias tablas de datos termodinámicos para gases ideales y reales. Los valores de h en esas tablas dependen de como se elija el estado de referencia. Los datos para los gases ideales, por ejemplo, se basan arbitrariamente en un valor cero de la entalpía a la temperatura del cero absoluto. Los datos para el vapor, sin embargo, se basan en el valor de referencia cero para el líquido saturado en el estado triple.

Como los estados de referencia son del todo arbitrario, al utilizar la ecuación se obtendrán resultados diferentes para H al emplear tablas basadas en distintos estados de referencia. Para solucionar esta dificultad se introduce el concepto de entalpía de formación h_f de una sustancia pura: ***La entalpía de formación se define como el cambio de entalpía que ocurre cuando un compuesto químico se forma isotérmicamente a partir de sus elementos estables a presión constante.***

$$\Delta h_f = h_{comp} - \sum_i (v_i h_i)_{\text{elementos estables}} \quad (52)$$

donde v_i representa de nuevo el coeficiente estequiométrico para el elemento dado.

En el anexo E; se dan los datos de entalpía de formación para varias sustancias comunes, estos datos son para un estado de 25°C (298.15 K) ó 77°F (536.7 R) y presión unitaria para

estas tablas es 1 atm. Esta elección de temperatura y presión es un estado de referencia estándar para los cálculos termodinámicos.

Las propiedades a presión unitaria (1 atm.) se simbolizan mediante el superíndice "o". En consecuencia, los valores de la entalpía de formación en el anexo E se simbolizan como h_f^o .

Si al formarse un compuesto a partir de sus elementos se libera energía, el valor de h_f^o es negativo.

Si la ecuación se reacomoda, entonces, en el estado de referencia estándar

$$h_{comp,ref} = \Delta h_{f,298}^o + \sum_i (v_i h_i)_{elementos\ estables} \quad 53)$$

Esta ecuación relaciona la entalpía de un compuesto con su entalpía de formación y la entalpía de los elementos a partir de los cuales se forma, todo ello en el estado de referencia estándar.

Por convención, se asigna el valor cero a la entalpía de todos los elementos estables en el estado de referencia estándar de 1atm y 25°C

La ecuación 53, puede escribirse ahora como :

$$h_{comp,ref} (a 25^{\circ}C \text{ y } 1 atm) = \Delta h_{f,298}^{\circ} = \Delta h_{f,537}^{\circ} \quad 54)$$

Por tanto, la entalpía de cualquier compuesto (o elemento inestable) a 298 K (537 R) y 1 atm es igual a su entalpía de formación en ese estado, mientras que la entalpía de los elementos estables en ese mismo estado es cero.

El paso final consiste en evaluar la entalpía de una sustancia pura a una temperatura y presión especificadas, diferentes del estado de referencia estándar de 1 atm. Para lograr esto, hay que agregar el valor dado por la ecuación el cambio de entalpía entre el estado de referencia estándar de 25° C y 1 atm y el estado especificado, es decir,

$$h_{comp,ref} = \Delta h_{f,298}^{\circ} + (h_T - h_{298})_i \text{ gas ideal} \quad 55)$$

h_T : Entalpía de la temperatura especificada T.

h_{298} : Entalpía a la temperatura de referencia de 298 K (537 R)

Si no se dispone de datos tabulados para evaluar el último término en la ecuación 55, el cambio de entalpía $(h_T - h_{298})_i$ para un gas ideal se deberá calcular a partir de la integración de $C_p \cdot dT$. Así, la entalpía de cualquier sustancia pura se compone de dos partes: una es la parte asociada con su formación a partir de elementos estables en un estado de referencia estándar y la otra es la asociada con un cambio de estado a composición constante.

El balance de energía en estado y flujo estables o estacionario para procesos que incluyen reacciones químicas e convierte en

$$Q + W_{eje} = \sum_{prod} N_i (\Delta h_{f,298}^o + \Delta h)_i - \sum_{react} N_i (\Delta h_{f,298}^o + \Delta h)_i \quad (56)$$

donde $\Delta h = h_{T,P} - h_{298,1atm}$

En la expresión anterior se han despreciado los cambios de la energías cinética y potencial. En muchos procesos de combustión no existe trabajo mecánico para el volumen de control elegido. Además, el efecto de la presión sobre la entalpía a menudo se puede ignorar, como en el caso de las presiones bajas. Con estas restricciones, el balance de energía se reduce a

$$Q = \sum_{prod} N_i (\Delta h_{f,298}^o + \Delta h)_i - \sum_{react} N_i (\Delta h_{f,298}^o + \Delta h)_i \quad (57)$$

Se quema metano gaseoso, que entra a un quemador a una temperatura de 30°C , la reacción teórica del CH₄ con aire en un 15% de exceso, determina una relación de moles igual a 10.948 kg mol aire / kg mol CH₄, la relación de aire combustible $AC = 19.84$ kg aire / kg CH₄.

Al proceso de secado se le debe suministrar una cantidad de calor, Q_T , igual a:

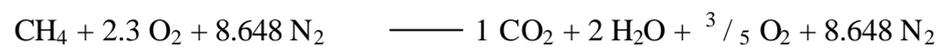
⁶ Las reacciones químicas que liberan energía en forma de calor reciben el nombre de *exotérmicas*, mientras las que absorben energía son *endotérmicas*.

$$Q_T = 501340 \text{ kcal/hr} = 2'096.553, 74 \text{ kJ/hr}$$

Aplicando un factor por perdidas de calor al ambiente del 10%.

$$Q_T = 2'300,700 \text{ kJ/hr}$$

La ecuación estequiométrica de la combustión, con 15% de exceso de aire:



Los datos de entalpía para todos los gases, excepto el metano, se obtiene de los anexos F hasta el anexo I, mientras que las entalpías de formación se encuentran en el anexo E

No se poseen datos tabulados que permiten el cambio de entalpía para el metano de 298 a 303 K. Esta cantidad se puede determinar integrando los datos de C_p . Una ecuación para el C_p del metano, que se puede encontrar en el anexo J

$$\frac{(C_p)_{\text{CH}_4}}{R_u} = A + BT + CT^2 + DT^3 + ET^4 \quad 58)$$

del la tabla del anexo J, tenemos

$$A = 3.826$$

$$B = -3.979 \times 10^3$$

$$C = 24.558 \times 10^6$$

$$D = -22.733 \times 10^9$$

$$E = 6.963 \times 10^{12}$$

$$\Delta h_T = \int_{298}^{303} c_p \cdot dT = 178.25 \text{ kJ/kg mol } CH_4$$

La sumatoria de la entalpía de los reactivos de la combustión:

$$\sum_{\text{reac}} N_i (\Delta h_{f,298}^\circ + \Delta h)_i = 1x(-74850 + 178.25) + 2.3x(0 + 0.1437) + 8.648x(0 + 0.14)$$

$$\sum_{\text{reac}} N_i (\Delta h_{f,298}^\circ + \Delta h)_i = -74670.2 \text{ kJ/kgmol } CH_4$$

La sumatoria de la entalpía de los productos de la combustión

$$\sum_{\text{prod}} N_i (\Delta h_{f,298}^\circ + \Delta h)_i = 1x(-393520 + h_{T,CO_2} - 936474) + 2x(-241820 + h_{T,H_2O} - 9904)$$

$$+ \frac{3}{5}(0 + h_{T,O_2} - 8682) + 8.648x(0 + h_{T,N_2} - 8669)$$

$$\sum_{\text{prod}} N_i (\Delta h_{f,298}^\circ + \Delta h)_i = -986510 + h_{T,CO_2} + 2h_{T,H_2O} + \frac{3}{5}h_{T,O_2} + 8.648h_{T,N_2} \quad 57'$$

haciendo uso de las tablas de los anexos F hasta J, y asumiendo una temperatura promedio dentro del rango de temperatura de los gases productos de la combustión, ($T = 1400 \text{ K}$) llenamos el cuadro que se muestra a continuación:

Cuadro 4. Valores de la entalpía de los productos a la temperatura especificada

Productos de la combustión	Temperatura (K) = 1400K
$1h_{T,CO_2}$	65,271
$2h_{T,H_2O}$	106,702
$3/5 h_{T,O_2}$	27388.8
$8.648 h_{T,N_2}$	377096.04
S	576457.84

sustituyendo los valores del cuadro 4 en la ecuación 43', obtenemos la sumatoria de la entalpía de los gases productos de la combustión

$$\sum_{prod} N_i (\Delta h_{f,298}^o + \Delta h)_i = -410052.87 \text{ kJ/kgmol } CH_4$$

El calor liberado por la reacción química, resulta al reemplazar los valores de la sumatoria de la entalpía de los productos y la sumatoria de la entalpía de los reactivos, este valor es:

$$Q = - 335,382.67 \text{ kJ / kg mol } CH_4$$

La cantidad de combustible necesitado para alcanzar la cantidad de calor requerido en el sistema n , viene dado por la relación:

$$n = \frac{Q_T}{Q} \quad 59)$$

$$n = 6.86 \text{ kg mol CH}_4 / \text{hr} = 109.75 \text{ kg CH}_4 / \text{hr}$$

la cantidad de aire requerido para la combustión m_p

$$m_p = AC.n$$

$$m_p = 2,177.44 \text{ kg aire} / \text{hr}$$

La temperatura de los gases productos de la combustión resultan extremadamente alto comparada con la temperatura requerida a la entrada del secador, por otro lado el volumen de aire que se necesita para realizar la operación de transporte y secado no es el suficiente para realizar dicho proceso.

Es necesario suministrar un volumen de aire secundario, el cual se calcula a través de un balance de materia en la cámara de combustión del quemador, como lo ilustra la figura 33.

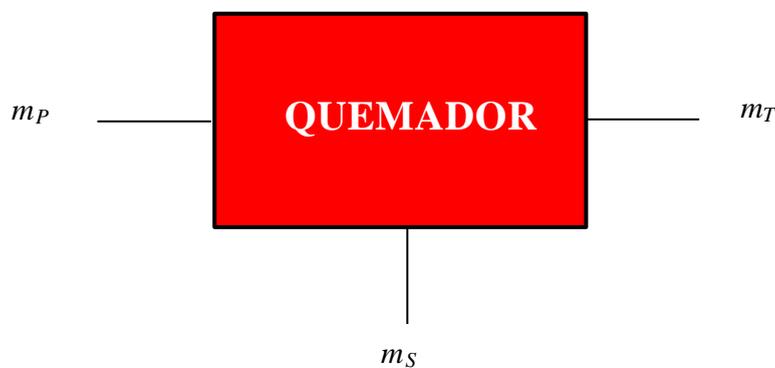


Figura 33. Presentación esquemática de un quemador con entrada de aire secundario

$$m_T = m_p + m_S \quad (60)$$

Despejando m_S y sustituyendo los valores correspondientes

$$m_S = 9,523 \text{ kg aire / hr}$$

m_S es la cantidad de aire secundario al interior de la cámara generadora de aire caliente.

Se realiza un balance de calor al interior de la cámara generadora de aire caliente, esta viene dada por la expresión:

$$m_p \cdot C_p \cdot (T - T_R) + m_s \cdot C_p \cdot (T_{amb} - T_r) = m_T \cdot C_p \cdot (T_1 - T_R) \quad (61)$$

$$C_p (600 \text{ K}) = 1.051 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

$$C_p (300 \text{ K}) = 1.005 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

$$C_p (\sim 1400 \text{ K}) = 1.226$$

$$T_R = 273 \text{ K}$$

$$T_1 = 600 \text{ K}$$

$$T_{amb} = 300 \text{ K}$$

Despejando el valor de T, obtenemos que esta tiene un valor de:

$$T = 1682.74 \text{ K}$$

4.7. CALCULO DE LAS DIMENSIONES DEL CICLÓN

Inicialmente se seleccionó un ciclón teniendo en cuenta el ducto transportador del material húmedo. Esta selección se hace de la siguiente manera.

Conocido el diámetro del ducto transportador igual a 0.6 m (23.6 pulg) y utilizando el concepto de radio hidráulico se busca en la tabla en anexo L y se obtiene las dimensiones laterales de la sección rectangular a la entrada del ciclón.

Del siguiente cuadro se elige una sección rectangular de dimensiones 28" x 17", debido a una menor inversión en los costos de los materiales tanto del ducto a la entrada y en el tamaño final del ciclón.

Esta área conforma la entrada a un solo ciclón y sirve como punto de partida para calcular las demás dimensiones de este, a través de las proporciones específicas de la figura 36, de donde,

$$H_c = 28 \text{ in (71.12 cm)}$$

$$B_c = 14 \text{ in (35.56 cm)}$$

$$D_c = 56 \text{ in (142.24 cm)}$$

$$D_e = 28 \text{ in (71 cm)}$$

$$L_c = Z_c = 112 \text{ in (284 cm)}$$

$$S_c = 7 \text{ in (17.75 cm)}$$

$$J_c = 14 \text{ in (35.56 cm)}$$

Cuadro 5. Sección de entrada al ciclón (de un área circular, su equivalente rectangular) *

F Diámetro del ducto (in)	H_i (in)	B_c (in)
23.6	64	9
23.6	48	11
23.6	32	15
23.6	28	17

4.7.1. Caída de presión en un sistema particular de ciclón. Las condiciones de operación del ciclón son:

12000 cfm, 158°C (316 °F), $P_B = 29.92$ pulg de agua, Y_2 (granos de agua / lb aire seco) = 602

* El cuadro 5, señala en azul la selección hecha con base a los valores tomados en el anexo L, ellos son los valores de la sección transversal del ducto de entrada a un ciclón.

Cuadro 6. Dimensiones de la admisión y la descarga del ciclón preliminar.

Sección (sq-ft)	Tamaño (sq-ft)	Gas velocity (ft/seg)	Velocity Head (in water)
Ducto a la entrada	3.0	218	10.69
Entrada al ciclón	2.72	73.52	1.21
Ducto salida del ciclón	4.27	46.77	0.49

Perdida de fricción en el ciclón

$$F_{cv} = \frac{KB_c H_c}{D_e^2} \quad (62)$$

donde

$$B_c = 14 \text{ in}$$

$$H_c = 28 \text{ in}$$

$$D_e = 28 \text{ in}$$

$$F_{cv} = 8.0 \text{ vel head}$$

$$\text{Perdida de fricción} = 8 \times 1.21 = 9.68 \text{ pulgadas de agua}$$

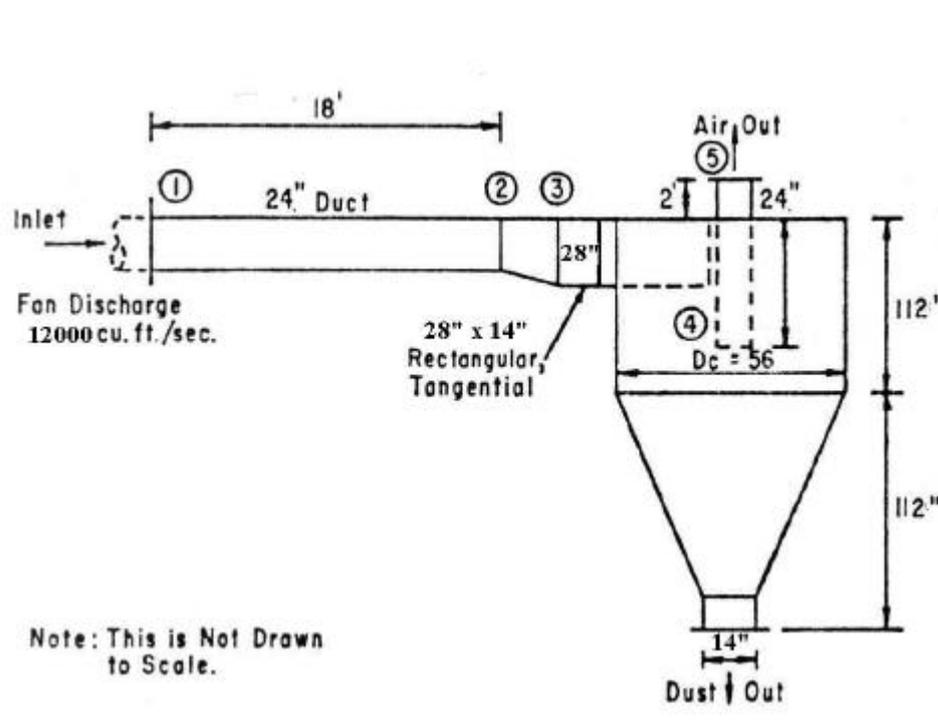


Figura 34. Esquema del análisis de las pérdidas por fricción en un ciclón.

El factor de diseño primario que se utiliza para controlar la eficiencia de recolección es el diámetro del ciclón. Una unidad de diámetro pequeño que funciona con una caída de presión fija alcanza la eficiencia más alta. Sin embargo, los ciclones de diámetro más pequeño requieren varias unidades en paralelo para lograr una capacidad especificada. En tales casos, los ciclones individuales descargan el polvo en una tolva receptora común. Se acostumbra diseñar un ciclón simple para una capacidad particular, recurriendo a varias unidades en paralelo sólo cuando la eficiencia de recolección prevista es inadecuada para una sola unidad.

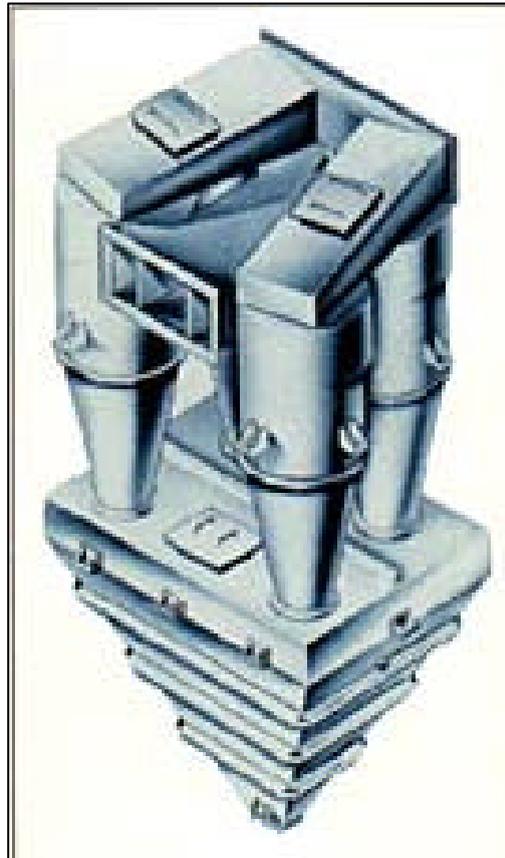


Figura 35. Configuración de cuatro ciclones en paralelo-

La configuración mostrada a través de la figura 35, se denomina Quad Duclon y fue diseñado y fabricado por la empresa DUCON*. Las nuevas dimensiones de este juego de ciclones en paralelo, se determinan a continuación.

La sección transversal a la entrada de los ciclones tienen las siguientes dimensiones: $H_c = 28$ y $B_c = 17$, estos son alto y ancho respectivamente. La configuración de los ciclones supone que la sección total a la entrada del sistema de ciclones es más ancho que alto, por

* THE DUCON COMPANY, INC. 147 EAST SECOND ST. MINEOLA, L.I., n.y. 11501

tal motivo se invierte el valor de dichas dimensiones. Esta operación determina que el ancho B_c sea igual a 28 in y la altura H_i sea igual a 17 in.

Con esta consideración hecha se procede a dividir a B_c en cuatro partes iguales, para dimensionar los ductos de entrada a los ciclones. De esta manera conociendo una de las dimensiones del ducto de entrada, podemos determinar las demás dimensiones que conforman el cuerpo del ciclón, como ya se observó anteriormente en esta misma sección.

Las dimensiones para un ciclón del conjunto Quad Duclon son las siguientes:

Tabla 3. Dimensiones de un ciclón modelo Quad Duclon

<i>Dimensiones</i>	<i>in</i>	<i>Cm</i>
B_c	7	17.78
H_i	14	71.12
D_c	28	35.56
L_c	56	142.24
Z_c	56	142.24
S_c	3.5	8.89
J_c	7	17.78

Ver figura 36.

Un estudio más amplio acerca de este tipo de equipo, se encuentra en el capítulo 5 de este proyecto, siendo más claro aún los criterios necesarios para realizar una adecuada selección del equipo más eficiente para esta aplicación. Es importante resaltar que la escogencia del Quad Duclon se debe al gran volumen de aire a tratar, el tamaño de la partícula a separar y que la eficiencia aumenta a medida que disminuye el diámetro de la sección circular del ciclón, ofreciendo este una alta eficiencia y un manejo más óptimo del material a tratar, almidón de yuca.

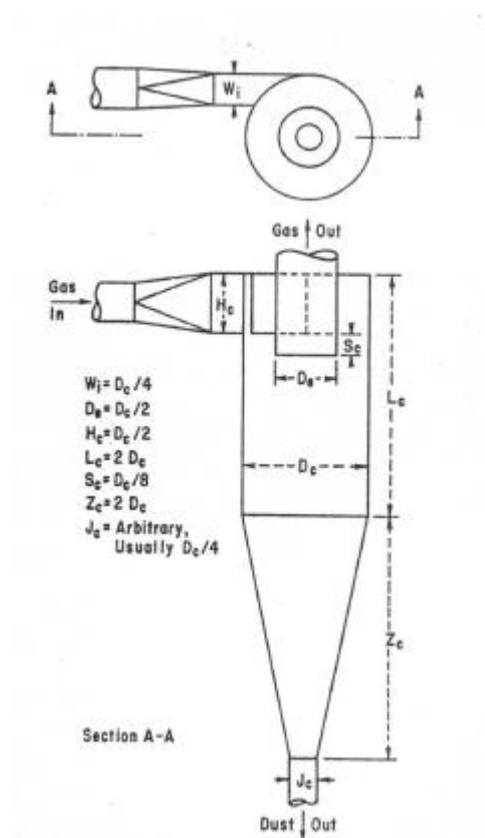


Figura 36. Proporciones de un ciclón separador y sistema de ductos

4.8. CAÍDA DE PRESIÓN EN EL SISTEMA

La caída de presión total en una tubería horizontal se considera como la suma de las siguientes caídas de presión individuales.

4.8.1. Para acelerar el gas a la velocidad de transporte, ΔP_{aG}

$$\Delta P_{aG} = \frac{G_G V_G}{2g_C} \quad (63)$$

$$\Delta P_{aG} = 14.37 \text{ kg / m}^2$$

4.8.2. Para acelerar las partículas sólidas, ΔP_{aS}

$$\Delta P_{aS} = \frac{G_S V_S}{g_C} \quad (64)$$

$$\Delta P_{aS} = 30.09 \text{ kg / m}^2$$

4.8.3. Para la fricción entre el gas y la pared de la tubería, ΔP_{fG}

$$\Delta P_{fG} = \frac{4f_G L G_G V_G}{2g_C D_t} \quad (65)$$

$$?p_{fG} = 212.06 \text{ [kg / m}^2 \text{]}$$

4.8.4. Para la fricción combinada entre las partículas y la pared de la tubería, entre el gas y las partículas y la pared de la tubería, entre el gas y las partículas y entre estas mismas, suponiendo que dicha fricción se puede expresar por medio de un tipo de ecuación de factor de fricción.

$$\Delta p_{fs} = \frac{4f_s L G_s V_s}{2g_c D_i} \quad (66)$$

$$?P_{fs} = 979.63 \text{ kg / m}^2$$

$$4f_s = \frac{3r_G D_i C}{2r_s D_s} \left(\frac{V_G - V_s}{V_s} \right)^2 \quad (67)$$

$$4f_s = 3.34$$

4.8.5. Para el soporte de la columna de gas, $?P_{hG}$

$$\Delta p_{hG} = \frac{G_G g L}{V_G g_c} \quad (67)$$

$$?P_{hG} = 11.7 \text{ kg / m}^2$$

4.8.6. Para el soporte de los sólidos, ΔP_{hs}

$$\Delta P_{hs} = \frac{G_s g L}{V_s g_c} \quad (68)$$

$$\Delta P_{hs} = 2 \text{ kg} / \text{m}^2$$

4.8.7. Caída total de presión

El calculo total de la caída de presión en el sistema resulta de la sumatoria de los ΔP_j .

$$\Delta P_T = \sum \Delta P_i + \Delta P_{cv} \quad (69)$$

$$\Delta P_T = 1366.85 \text{ kg} / \text{m}^2 = 53.76 \text{ pulg. de agua}$$

4.8.8. Calculo de las variables

4.8.8.1. ΔP : Caída de presión

4.8.8.2. D_s : Diámetro de la partícula sólida

$$D_s = 76 \mu\text{m}$$

4.8.8.3. D_t : Diámetro del tubo o tubería. $D_t = 0.6 \text{ m}$

4.8.8.4. f_G : Factor de fricción de fanning. El factor de *fanning* se determina a través de la figura L1 del anexo L, y este está en función del N_{Re}

$$N_{Re} = \frac{D_t V_a}{\mathbf{g}} \quad 70)$$

donde,

? : viscosidad cinemática

En la figura xxx para una temperatura de 120°C , valor para el cual la curva de aire determina un valor de ? es igual $2.4 \times 10^{-5} \text{ [m}^2 \text{ / seg]} = 0.0864 \text{ [m}^2 \text{ / hr]}$

$$V = 246870 \text{ [m / hr]}$$

$$D = 0.6 \text{ [m]}$$

Entonces,

$$N_{Re} = 1.714375 \times 10^6$$

$$f_G = 0.00275$$

f_s = Factor de fricción de sólidos, deducido de la ecuación 67)

4.8.8.5. G_G : flujo másico del gas

$$G = r_{dG} V_G \quad 71)$$

$$G_G = 145470 \text{ kg} / \text{m}^2 \text{ hr}$$

4.8.8.6. r_{dG} : densidad del gas disperso

$$r_{dG} = \frac{\text{peso de gas}}{\text{unidad de volumen de la tubería}} = \frac{m}{V} \quad 72)$$

El peso del gas se calcula, a través de la ecuación general de los gases

$$m = \frac{PV}{RT} \quad 73)$$

$$P = 101.3 \text{ kpa}$$

$$V = S \cdot L = (0.28)(30) = 8.4 \text{ m}^3$$

$$T = T_1 = 326 \text{ }^\circ\text{C} = 599 \text{ K}$$

$$R = R_u / M$$

La masa molecular del aire M , es igual a 28.97 kg mol

$$R_u = 8.314 \text{ kJ / kg mol K}$$

$$R = 0.287 \text{ kJ / kg K}$$

Sustituyendo estos valores en la ecuación 73), se tiene:

$$m = 4.94 \text{ kg}$$

La densidad del gas disperso,

$$\rho_{dG} = 0.58 \text{ kg / m}^3$$

V_G : Velocidad real del gas.

$$V_G = 246870 \text{ m / hr}$$

G_S : Flujo másico del sólido

$$G_S = r_{ds} V_S \quad (74)$$

$$G_S = 37030.5 \text{ kg} / \text{m}^2 \text{ hr}$$

$$m_s = 1100 \text{ kg} / \text{hr}$$

ρ_{dS} : Densidad de los sólidos dispersos,

$$\frac{\text{peso de sólidos}}{\text{unidad de volumen de la tubería}} = \frac{\dot{m}_S}{V'} \quad (75)$$

El peso de sólido seco por unidad de tiempo, es igual a

La unidad de volumen de la tubería la expresamos en función del flujo volumétrico del aire que pasa a través de ella, V'

Utilizando la relación $V' = \rho_a \dot{V}$

Donde:

ρ_a : volumen específico del aire a la temperatura de salida

Una mezcla de aire y vapor de agua a 158°C y 101.3 kPa y tiene una humedad relativa $F_2 = 50 \%$, se determina el volumen específico, en m^3 / kg de aire seco, a través de la ecuación.

$$v = \frac{RT}{P_a} \quad 76)$$

La presión de saturación P_g a $158 \sim 160 \text{ }^\circ\text{C}$ es $6.178 \text{ bares}^7 \sim 617.8 \text{ kPa}$, por lo tanto la presión real de vapor P_v es $FP_g = 0.5 \times 617.8 \text{ kPa} = 308.9 \text{ kPa}$.

$$P_a = P - P_v = 101.3 \text{ kPa} - 308.9 \text{ kPa}$$

$$P_a = 207.6 \text{ kPa}$$

Con estas consideraciones el ρ es igual a:

$$v = 0.59 \text{ m}^3 / \text{kg aire seco}$$

$$\rho_a = 1.7 \text{ kg} / \text{m}^3$$

entonces,

$$V' = n \cdot \dot{m} = 0.59 [m^3 / kg] \cdot 11700 [kg / hr]$$

$$V' = 6963.82 [m^3 / hr]$$

La densidad de sólidos dispersos ρ_{ds} , se obtiene reemplazando los valores respectivos en la ecuación 63).

$$\rho_{ds} = 0.15 \text{ kg} / \text{m}^3$$

⁷ Tabla para vapor A – 12 M, Termodinámica Kenneth Wark, 5^{ta} edición.

4.8.8.7. V_s : Velocidad de los sólidos

La velocidad de los sólidos es aproximadamente igual al 80% de la velocidad del aire de acarreo $V_a = 4114.5 \text{ m/min}$ (246870 m/hr)

$$V_s = 197496 \text{ m/hr}$$

4.8.8.8. g_c : Constante dimensional

4.8.8.9. L : Longitud de la tubería

$$L = 30 \text{ m}$$

4.8.8.10. C : Coeficiente de arrastre, adimensional

Obtenido en la figura 37, para N_{Re} igual a

$$N_{Re} = \frac{D_s (V_G - V_S) \rho_G}{m_G} \quad (77)$$

$$N_{Re} = 4.34$$

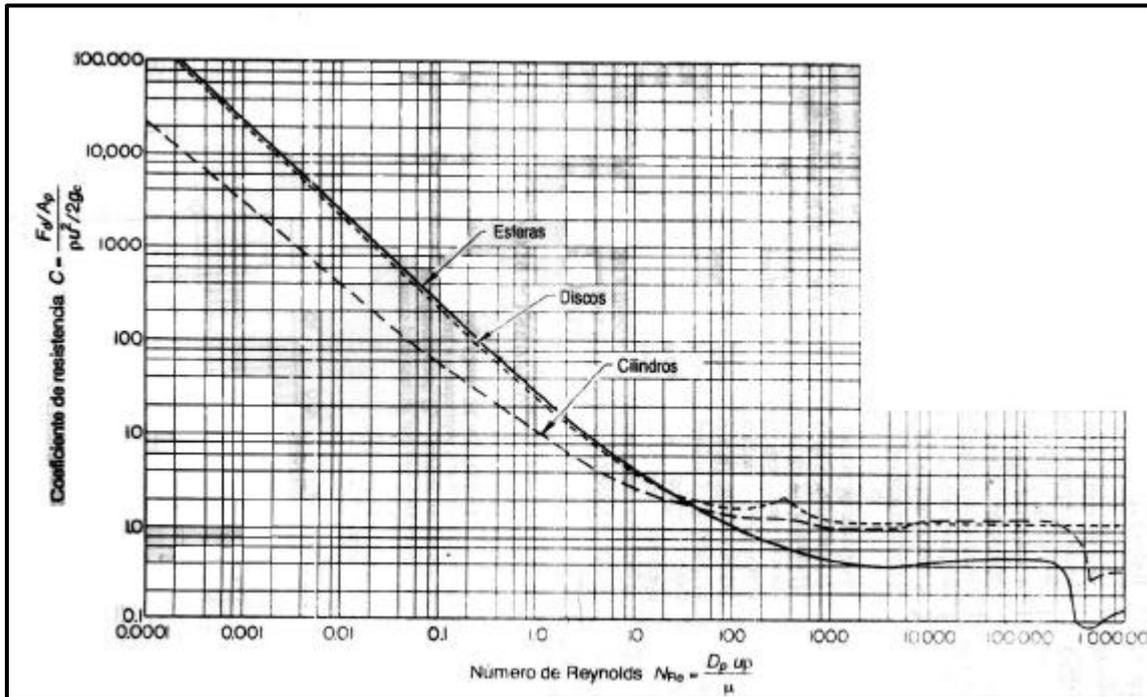


Figura 37. Coeficiente de resistencia para esferas, discos y cilindros.

A_p = área de la partícula proyectada sobre un plano normal en la dirección del movimiento

C = Coeficiente general de resistencia, adimensional

D_p = Diámetro de las partículas

F_d = Resistencia al movimiento del cuerpo del fluido

U = velocidad relativa entre la partícula y el cuerpo principal del fluido

μ = Viscosidad del fluido

ρ = Densidad del fluido

5. ESTUDIO DETALLADO DE LOS ELEMENTOS QUE CONFORMAN EL TRANSPORTADOR NEUMÁTICO

5.1. VENTILADORES

Un ventilador es una máquina volumétrica que traslada fluido de una parte a otra, venciendo determinada presión. En otras palabras los ventiladores hacen dos cosas: suministran presión estática necesaria y mueven el aire.

En un sistema de extracción localizada el ventilador es el elemento encargado de comunicar al aire la energía necesaria para arrastrarlo hasta el punto de captación y hacerlo circular por los ductos y elementos de limpieza antes de devolverlo de nuevo a la atmósfera. Un ventilador crea una presión estática positiva sobre el lado de las aspas que impulsan el aire hacia delante (hacia la chimenea) y una presión estática negativa sobre el lado contrario de las aspas que aspira el aire (hacia la campana).

Los fabricantes y distribuidores de ventiladores son buena fuente de información y pueden proporcionar el ventilador necesario, pero que se requiere saber que es lo que se necesita.

Hay muchos tipos de ventiladores. Generalmente se puede agrupar cualquier tipo de ventilador en dos grupos muy amplios, ventiladores *centrífugos* y ventiladores *axiales*.

Los ventiladores axiales, tienen rotores tipo hélice y el flujo del aire es a lo largo del eje de la hélice. Los ventiladores *centrífugos*, tienen un flujo de aire que al entrar este al rotor es volteado 90° en todas las direcciones. Normalmente el aire se captura en la carcasa o housing y se empuja por la descarga del ventilador.

Los ventiladores *centrífugos* se clasifican como de aspas radiales, de curvatura al frente de curvatura inversa o inclinadas y aerodinámicas. (Ver figura 38) Entre estas los ventiladores *centrífugos* con aspas radiales, tienen buen rendimiento en muchas aplicaciones, que pueden ser desde transportación neumática hasta extracción de aire o gas del proceso en sistemas de altas resistencias. Su principal característica es la flexibilidad en la construcción de anchura proporcional, que permite lograr alta presión estática con una capacidad mas o menos baja.

Este ventilador puede producir altas presiones a altas velocidades. Las aspas tienden a ser autolimpieza y pueden ser de alta resistencia estructural.

TIPO DE VENTILADOR						
Aplicación	Tuboaxial	Axial con aletas de guía	Radial	Con curvatura al frente	Con curvatura hacia atrás	Aerodinámico
Sistema de transportación			X		X	
Suministro de aire a quemador	X	X	X	X	X	X
Ventilación de la planta			X	X		
Calderas de tiro forzado			X	X		
Calderas de tiro inducido		X			X	X
Escape de hornos rotatorios	X					
Torres de enfriamiento	X	X	X		X	X
Colectores de polvo			X	X		
Alimentación de hornos rotatorios			X	X		

5.1.1. Ventiladores Centrífugos de aspas radiales. Dentro de la categoría de ventiladores centrífugos o radiales existen numerosos tipos aerodinámicos. Entre las características notables están las formas y alturas de los alabes, véase figura 38.

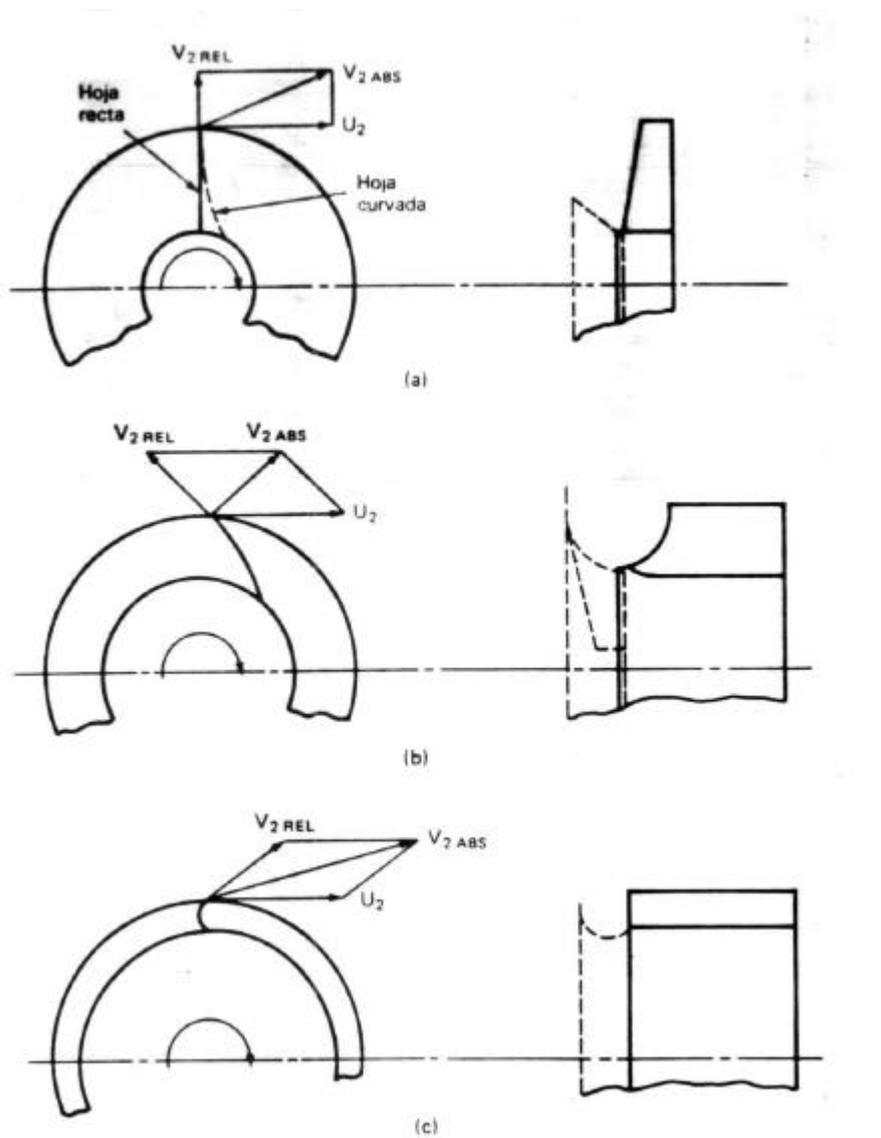


Figura 38. Diseños de alabes.

a) Descarga radial; b) Descarga en curva hacia atrás; c) descarga en curva hacia delante.

En general, los alabes radiales se utilizan en aplicaciones industriales donde es necesario considerar la erosión o corrosión. Cuanto más profundo sea el alabe, mayor será la presión

que el impulsor pueda desarrollar. La figura 39 ilustra el rendimiento de un ventilador de alabe radiales de alta potencia.

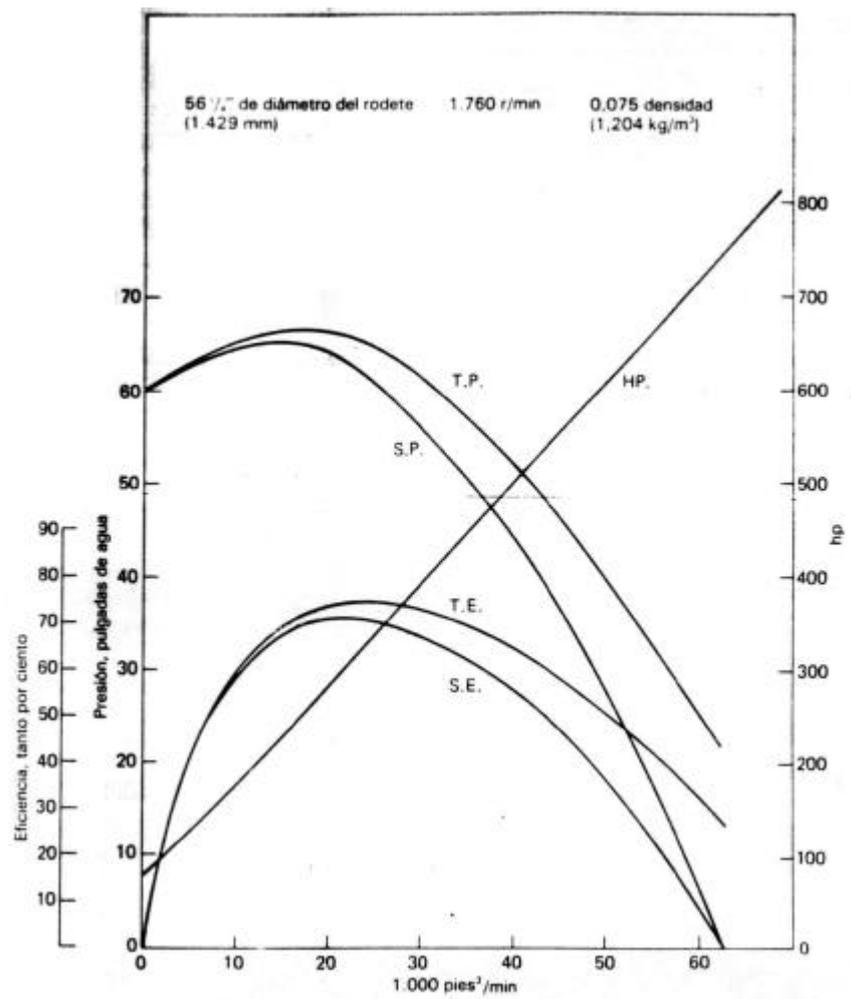


Figura 39. Rendimiento de un típico ventilador centrífugo

Donde TE = rendimiento global; SE = rendimiento estático; HP = Potencia; TP = Presión total, pulgadas de agua; SP = presión estática, en pulgadas de agua.

5.1.2. Parámetros para la selección de un ventilador: Para la selección de un ventilador es necesario tener en cuenta las siguientes variables:

5.1.2.1. Presión: La energía transmitida por el ventilador al aire debe ser exactamente igual a la energía perdida por el aire en el sistema. Las necesidades de ventilación y pérdidas en el sistema suelen ser expresadas en términos de energía por unidad de volumen de gases circulantes, que se conoce como presión. En ingeniería es necesario distinguir varias presiones según el método con el que se puedan medir las mismas o el tipo de energía con que se puedan identificar como sigue:

1. La presión total p_T en un punto de una corriente de gas que es la fuerza por unidad de área que se pueda medir con un manómetro conectado a un tubo de impacto apuntado directamente aguas arriba o flujo arriba. Es equivalente a la suma de la energía manométrica y la energía cinética de una unidad de volumen de gas, y existe debido a que depende de la densidad, velocidad y grado de composición del gas.
2. La presión estática p_S en un punto de una corriente de gas se refiere a la fuerza por unidad de área que se pueda medir con un manómetro conectado a un pequeño agujero en la pared de conducto u otras zonas límites cuya superficie debe estar en paralelo al paso de la corriente. Se puede considerar equivalente a la energía manométrica de una unidad de volumen de gas y depende de la densidad y grado de compresión del gas.
3. La presión dinámica p_V en un punto de una corriente de gas se refiere a la fuerza por unidad de área que se pueda medir con un manómetro, una extensión del cual está conectada a un tubo de impacto apuntado directamente flujo arriba y la otra extensión

conectada a un pequeño agujero en la pared del conducto (o su equivalente). Es igual a la energía cinética de una unidad de volumen de gas y depende de la densidad y velocidad del gas.

Las presiones en los sistemas de ventiladores se miden normalmente con alguna forma de indicador de columna de agua (WG) o (CA) o $C(H_2O)$, como el manómetro de tubo U o inclinado. La unidad de medida más habitual es el agua en pulgadas (kilopascal), abreviada como “WG (kPa)”

AMCA y ASHRAE han publicado conjuntamente un código de pruebas, AMCA 210-74/ASHRAE 51-75, que se utiliza como norma en la industria. En el mismo, las presiones de los ventiladores están definidas como sigue:

1. La presión total del ventilador P_{FT} es la diferencia entre la presión total de descarga o impulsión del ventilador P_{T2} y la presión total de admisión P_{T1} . Si no existe conexión de admisión, P_{T1} se asume igual a cero.

$$P_{FT} = P_{T2} - P_{T1} \quad 78)$$

2. La presión dinámica del ventilador P_{FV} es la presión de velocidad correspondiente a la velocidad media de descarga del ventilador P_{V2}

$$P_{FV} = P_{V2} \quad 79)$$

3. La presión estática del ventilador P_{FS} es la diferencia entre la presión total y la presión dinámica del ventilador.

$$P_{FS} = P_{FT} - P_{FV} \quad 80)$$

5.1.2.2. Capacidad (caudal). En el código de pruebas, la capacidad del ventilador esta definida como el caudal volumétrico medido en las condiciones de entrada del ventilador.

5.1.2.3. Densidad. La densidad del aire se puede determinar mediante la medición de la temperatura de bulbo húmedo, la presión barométrica y refiriéndose a la tabla de densidad psicométrica. La mayoría de los datos de rendimiento se publican para las condiciones que se tendría si el ventilador estuviera tratando el aire a la densidad normal de 1.2 kg/m^3 , que es básicamente la densidad de aire seco a 20°C y 101.3 kPa . Si se tienen otras condiciones, será necesario realizar correcciones de acuerdo con los principios de ventilador.

5.1.2.4. Formulas de potencia. La formula para potencia H en términos de rendimiento total n_T , presiones totales a las entrada y la salida P_{T1} y P_{T2} , respectivamente en WG (kilopascal), la capacidad de admisión Q_I en pies cúbicos por minuto es

$$H = \frac{Q_I(P_{T2} - P_{T1})K_P}{6.362h_T} \quad 81)$$

La potencia en términos de rendimiento estático n_s , presión estática a la salida P_{S2} y la presión total a la entrada P_{T1} , es

$$H = \frac{Q_1(P_{S2} - P_{T1})K_P}{6.362h_s} \quad 82)$$

El coeficiente de compresibilidad K_P se puede tomar generalmente como unidad para ventiladores especialmente aquellos que generan menos de 2.5 kPa. Las ecuaciones indicadas se basan en las Unidades del Sistema Coensetudinario de EE.UU.(USCS) y dan la potencia en caballos de vapor. El código de pruebas utiliza el símbolo H para denotar este valor, encontrándose con frecuencia el símbolo compuesto HP). Si se mide el Q_1 en metros cúbicos por segundo y las presiones en kilopascal, la potencia resultante será en kilovatios, siempre sustituyendo el factor 6.362 por 1.0.

5.1.3. Designaciones y configuraciones estándar. La industria de ventiladores, a través de la AMCA, ha creado determinadas designaciones estándar. Este apartado incluye extractos de aquellas para rotación, descarga, posición de caja de admisión, diseño de accionamiento y posición de motor. La información completa se encuentra en la Publicación 99-83 de AMCA.

El método de especificar la rotación consiste en la vista del ventilador desde el lado motor e indicar si la rotación es en el sentido de las agujas de reloj o inversa. El lado motor de un ventilador centrífugo de admisión simple es el lado opuesto a la admisión.

El método de especificar la posición de descarga se indica en la figura 40. Si el ventilador ha de ser colgado del techo o en una pared, se deberá especificar la descarga como si el ventilador estuviera montado en el suelo. Se indicará también la disposición final propuesta.

Las configuraciones de accionamiento tienen designaciones numéricas, como se muestra en la figura 41. Las designaciones para ventiladores axiales son iguales que en las normas para ventiladores centrífugos. Se podrán utilizar estos números oficiales para ventiladores fijados a la caja o sub-base como se muestra o para fijaciones sobre soportes. Para ventiladores pequeños se debe evitar el diseño con punto de apoyo en la admisión.

El método de especificar la posición de la caja de admisión consiste en la vista del ventilador desde el lado motriz (al igual que para la rotación) e indicar la posición de la abertura de admisión. Los ángulos se referirán respecto a una línea central horizontal, como se muestra en la figura 42. Las posiciones del motor reciben designaciones en letras, como se indica en la figura 43. Teniendo en cuenta los anteriores parámetros se envía una solicitud de cotización a la empresa SAE Ltda., con base en los requerimientos de nuestro proyecto, estos son:

Fluido: Aire Atmosférico

Temperatura de succión: 150°C

Presión estática: 54 pulgadas de agua

Flujo de diseño: 12000 CFM

SAE Ltda. oferto un ventilador centrífugo marca GAC modelo 39T100-150 de la serie 1706P5

Capacidad volumétrica de aire: 11600 CFM

Presión estática: 55 pulgadas de agua

Motor eléctrico de 185 HP marca Siemens (3500 rpm)

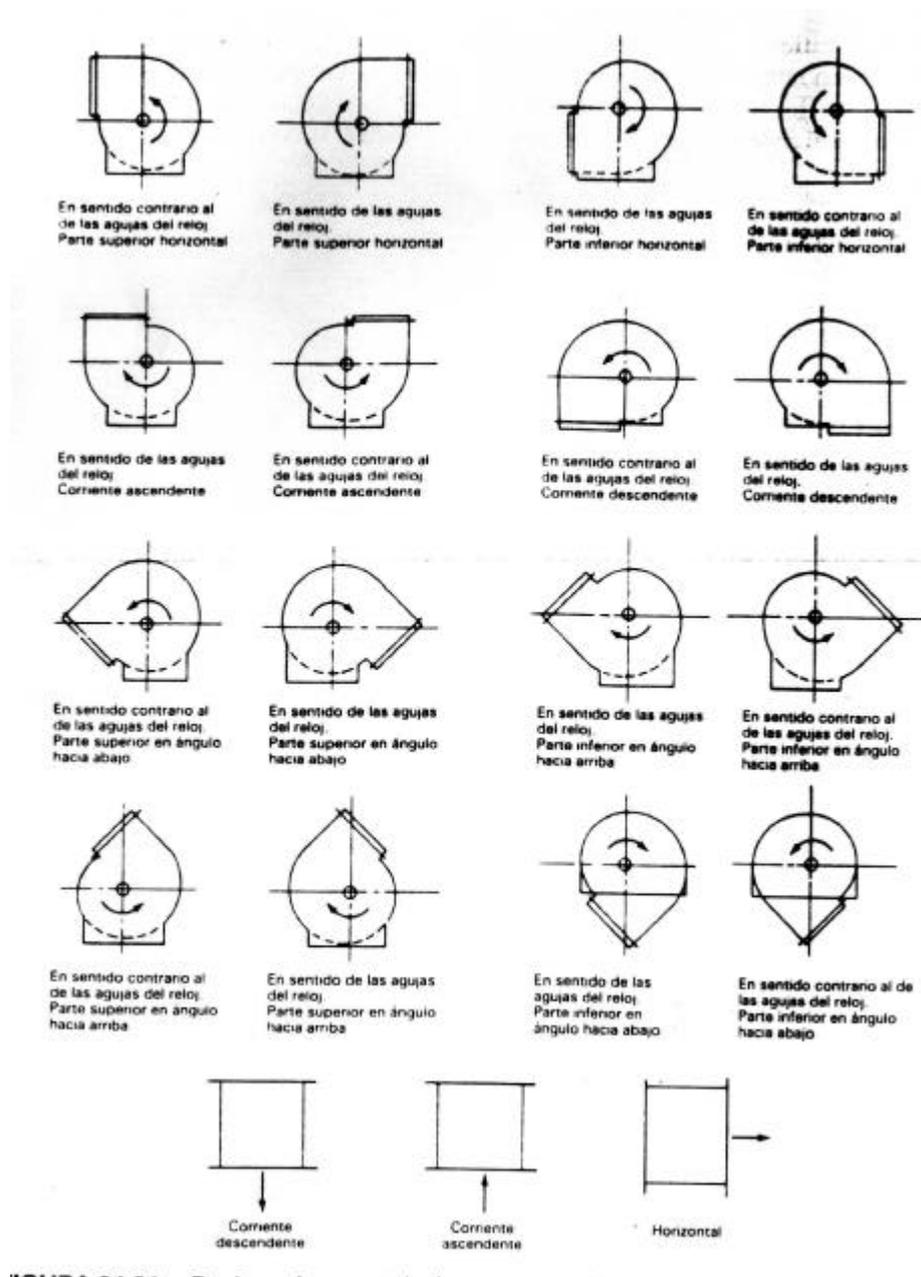
Bases antivibratorias

Compuerta de mariposa

Los precios y condiciones comerciales son los siguientes para una cotización realizada el 5 de Dic de 2001:

Valor unitario del ventilador centrífugo con motor y accesorios: \$33757.000', IVA no incluido. Entrega tres semanas para el ventilador. Para el motor la entrega estará supeditada a la disponibilidad que el fabricante confirme en el momento de recibir su recibo de compra y anticipo.

Para mayor información y actualización de equipos y precios SAE Ltda.. Apartado Aéreo 102302. Avda Suba No. 108-58 Torre A ofc. 501 Centro Ilarco – Bogota Colombia, Tel: 6241500-6241600-6241677



Designaciones estándar para rotación y descarga

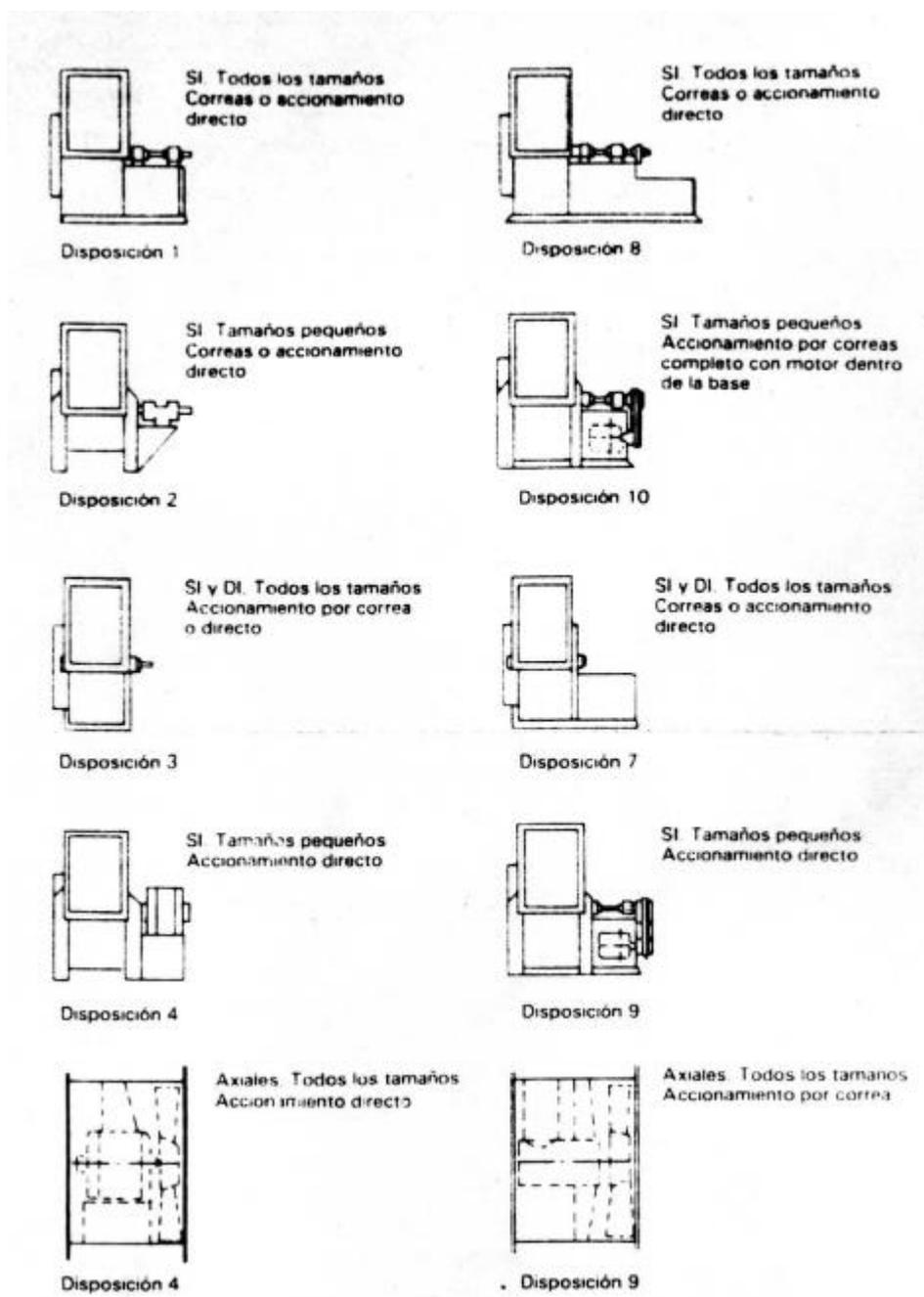


Figura 41. Diseños estándar de accionamiento

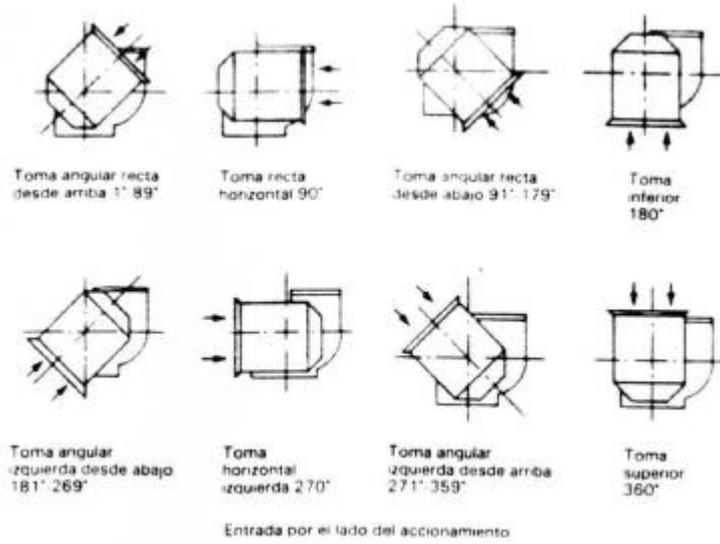


Figura 42. Posiciones estándar de la caja de admisión

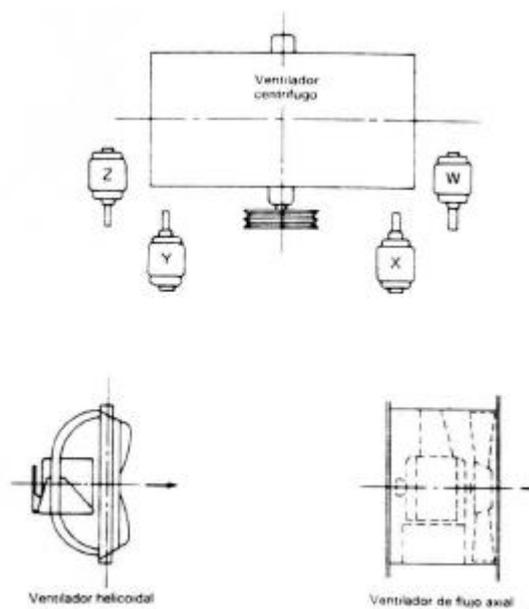


Figura 43. Posiciones estándar del motor

5.2. SEPARADORES DE FASE CENTRÍFUGOS

5.2.1. Selección del equipo de recolección de polvos.

Para seleccionar estos elementos, debe hacerse partiendo de una numerosa variedad de equipos, cuyo principio de operación puede fundarse en el asentamiento por gravedad, en la colisión, centrifugación, filtración o lavado y otros.

La cámara de sedimentación posee poca eficiencia cuando de partículas pequeñas se trata, debido a que la separación de partículas se limita a tamaños superiores a una maya de 325 o sea $43\mu\text{m}$. por otro lado el separador ciclónico se diseña para pequeñas caídas de presión (0.1 a 1.5 in de agua) y es esto lo que no permite un sistema en el que se transporte material sólido, para el que se necesitan apreciables caídas de presión

En el caso del sistema que se diseña (transporte neumático de partículas), se tiene un tamaño aproximado de partícula que varía entre 15 y 20 micras, con un sistema que alcanza las 50 in de agua en caída de presión.

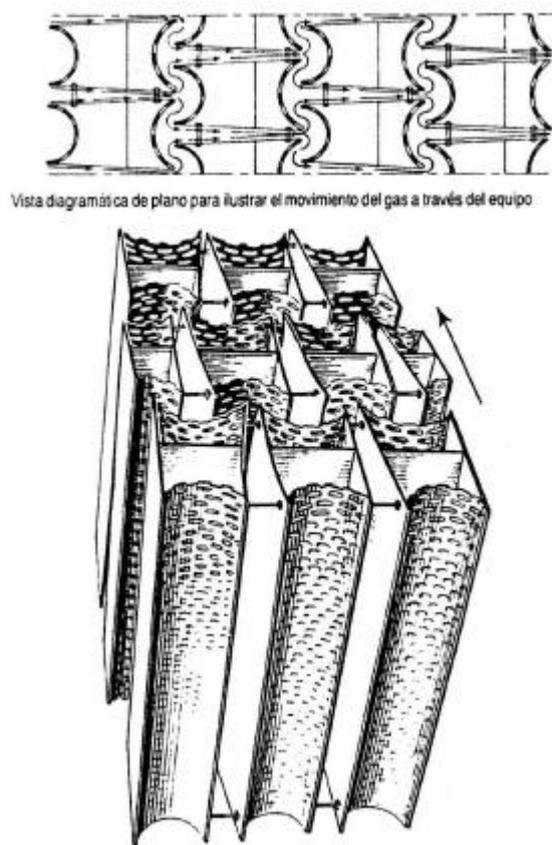


Figura 44 . Separador por choque de boquilla invertida

5.2.2. Ciclones. En el separador ciclónico, cuyo principio es la centrifugación se debe tener en cuenta que es uno de los medios menos costosos para la recolección de polvo, desde el punto de vista de la inversión y la operación. Su limitación principal es que a menos que se utilicen unidades muy pequeñas (diámetros pequeños de ciclón), la eficiencia de recolección para partículas menores de 5 es muy baja. Son dispositivos en los que se lleva a cabo una separación de fase bien sea de gas-sólido o gas líquido, dentro de una cámara cilíndrica cónica.

5.2.3. Funcionamiento. El gas entra cargado de partículas en uno o mas puntos tangencialmente a la cámara circular y sale de la misma a través de una abertura central ubicada en la parte superior; para que luego el material sólido mas pesado se precipite por la acción de la fuerza centrífuga y este es recolectado en una tolva receptora.

En un ciclón, la trayectoria del gas comprende un doble vórtice, en donde el gas dibuja una espiral descendente en el lado de fuera y ascendente en el lado interno. Cuando el gas penetra en el ciclón, su velocidad sufre una redistribución de tal modo que la componente tangencial aumente al reducirse el radio de la velocidad, como indica la expresión $V_c \sim r^{-n}$. La velocidad espiral dentro de un ciclón puede alcanzar un valor varias veces mayor que la velocidad promedio de entrada. Los análisis teóricos revelan que n es 0.52 para velocidades tangenciales medidas en la porción cilíndrica del ciclón, en posiciones que van desde el radio del ducto de salida del gas al radio del recolector.

5.2.4. Factores de diseño de un ciclón. Su diseño se hace generalmente de tal modo que se satisfaga ciertas limitaciones bien definidas de caída de presión. Para instalaciones comunes que operan mas o menos a la presión atmosférica, las limitaciones del ventilador dictaminan, casi siempre una caída de presión máxima permisible correspondiente a una velocidad de entrada dentro de los limites de 60 a 21m/s o (20 a 70 ft/s). La caída de presión en un ciclón, así como la pérdida de presión por fricción, se expresa de un modo mas conveniente en términos de la carga de velocidad basada en el área de entrada inmediata al ciclón. La carga de velocidad de entrada, expresada en pulgadas de agua, se relaciona con la velocidad promedio del gas de entrada y la densidad mediante la ecuación

$h_{vt} = 0.0030 \rho V_c^2$. En donde $\rho = \text{lb/ft}^3$ y $v_c = \text{ft/s}$. La pérdida por fricción en el ciclón es una medida directa de la presión estática y la potencia que debe desarrollar un ventilador y se relaciona con la caída de presión mediante la expresión.

$$F_{cv} = \Delta p_{cv} + 1 - (4A_c / \rho D_c^2)^2 \quad (83)$$

La pérdida por fricción en los ciclones que se encuentra en la práctica varía de 1 a 20 cargas de velocidad de entrada, según las proporciones geométricas⁸. Sin embargo, para un ciclón de proporciones geométricas específicas F_{cv} y ρ_{cv} son esencialmente constantes e independientes del tamaño real del ciclón.

Miller y Lissman [*Calculation of cyclone pressure drop*] artículo presentado en diciembre de 1940 en las reuniones de la ASME, New York] investigaron ciclones con una entrada espiral, ver figura 45, y obtuvieron la siguiente expresión empírica:

$$\Delta P_{cv} = K \left(\frac{D_c}{D_e} \right)^2 \quad (84)$$

El valor de K ha resultado sustancialmente constante con un valor de 3.2 en la siguiente gama de proporciones $(B_c / D_c) = 1/8$ a $3/8$; $(H_c / D_c) = 1$; $(D_e / D_c) = 1/4$ a $3/4$. Para valores menores que (D_e / D_c) , el valor de K aumenta, en tanto que para valores más

⁸ Alden, Design of Industrial Exhaust System, 3a ed., chap VII, Industrial Press, New York 1959; Shepherd y Lapple, op. cit

pequeños (B_c / D_c), disminuye. En estas pruebas, D_c , D_e y B_c variaron; pero no así H_c . Shepherd y Lapple investigaron los ciclones de tipo general que se muestra en la figura 46 y obtuvieron la siguiente expresión empírica.

$$F_{cv} = KB_c H_c / D_c^2 \quad 85)$$

Estas pruebas cubren las siguientes gamas de proporciones (B_c / D_c) = 1/12 a 1/4; (H_c / D_c) = 1/4 a 1/2 ; (D_e / D_c) = 1/4 a 1/2. Con la configuración normal en la cual la entrada rectangular termina en los elementos exteriores del cuerpo o cilindro del ciclón, se encontró que K tiene un valor de 16.

Si el lado interno del ducto de entrada se extendía más allá de la pared del cilindro del ciclón y penetraba en el espacio anular mas o menos hasta la mitad de la distancia a la pared opuesta, para formar una paleta de entrada la perdida por fricción se reducía más del 50% y se encontró que K era del orden de 7.5. Los valores de caída de presión calculados con la ecuación 84, para un valor de $K = 13$ coinciden con los datos de Miller y Lissman dentro de un margen de +/- 30%, casi en su totalidad. Para las proporciones específicas indicadas en la figura 36, $F_{cv} = 8$.



Figura 45. Ciclón con entrada helicoidal



Figura 46. Ciclón con entrada en voluta

5.2.5. Eficiencia de Recolección. Se han realizado varios intentos para calcular el diámetro crítico de partícula, es decir, el diámetro de la partícula más pequeña que teóricamente se separa de la corriente de gas con una eficiencia del 100%. Rosin y Rammler e Intelmann obtuvieron la ecuación 86 para el diámetro crítico de la partícula, considerando que la corriente del gas da un número determinado de vueltas a una velocidad espiral constante e igual a la velocidad promedio de entrada al ciclón sin ninguna turbulencia o acción de mezclado, y que la ley de Stokes es válida para el movimiento de una partícula en el campo centrífugo.

$$D_{p,\min} = \left[\frac{9mB_c}{\rho N_{tc} V_c (r_s - r)} \right]^{0.5} \quad (86)$$

donde N_{tc} es el número de vueltas que realiza la corriente del gas dentro del ciclón, ρ_s viene siendo la densidad de la partícula y ρ es la densidad del gas. Las partículas menores se eliminan hasta una extensión proporcional a la distancia inicial de las partículas respecto a la pared. El diámetro de corte D_{pc} que es el diámetro de partícula correspondiente a una eficiencia fraccionaria de 50% esta dada por:

$$D_{p,\min} = \left[\frac{9mB_c}{2\rho N_e V_c (r_s - r)} \right]^{0.5} \quad (87)$$

Donde N_e representa el número “eficaz” de vueltas que realiza la corriente de gas dentro del ciclón. Si N_e es igual a N_{tc} , la ecuación 87 da el diámetro teórico de corte. En la figura 47

aparece la curva de eficiencia teórica fraccionaria obtenida con base en las relaciones Rosin y Rammler e Intelman. Esta curva se muestra como una línea punteada y es una forma generalizada de la gráfica de eficiencia fraccionaria en la que la eficiencia de recolección para un diámetro determinado de partículas en función de la razón D_p / D_{pc} , es decir, el diámetro de partícula respecto al diámetro de corte.

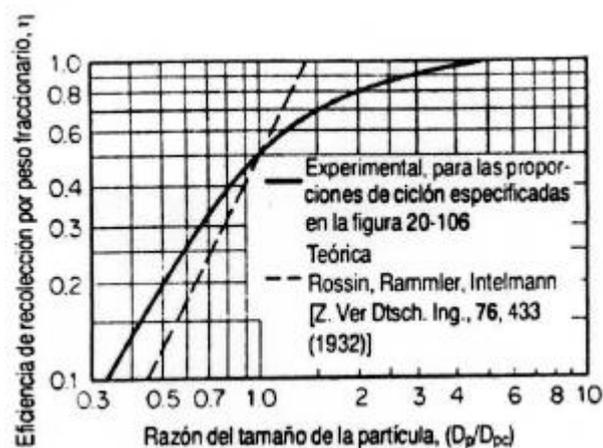


Figura 47. Curva de eficiencia de separación de ciclones

No existe un diámetro crítico de partícula debido a que el patrón de flujo es más complejo que el supuesto. Las partículas mayores que $D_{p, min}$ pasan a través del ciclón y la recolección de las partículas más finas es mayor que la calculada. El diámetro real de corte y la curva de eficiencia fraccionaria se deben determinar experimentalmente. En consecuencia, la ecuación 87 se puede utilizar como una definición de N_e , que se convierte en una constante empírica a evaluar en forma experimental. En ausencia de rearrastre, la curva de eficiencia fraccionaria determinada experimentalmente y el valor de N_e deben ser únicos para un ciclón de proporciones geométricas dadas. El valor de N_e se puede

considerar también con una medida aproximada de la eficacia para un tipo determinado de diseño de ciclón.

La curva empírica de eficiencia fraccionaria que aparece como una línea continua en la figura 47 se aplica a los ciclones con las proporciones dadas en la figura 36 y esta representada por la siguiente ecuación.

$$\mathbf{h} = \frac{\left(\frac{D_p}{D_{pc}} \right)^2}{1 + \left(\frac{D_p}{D_{pc}} \right)^2} \quad 88)$$

Que su ajusta dentro de la precisión de la cantidad limitada de datos de planta y laboratorio utilizados en la correlación (CE Lapple, comunicación privada). El rearrastre es, en apariencia, menor en estos experimentos y se descubrió que N_e es aproximadamente igual a 5.0. Aunque estos datos no eran muy exactos, el valor obtenido es quizá conservador, ya que unos datos señalaron que el valor de N_e ascendía incluso a 10. Si, como se describió antes, se utiliza una paleta de entrada con este ciclón, el rearrastre se hace apreciable y el valor aparente de N_e viene a ser, aproximadamente, 2 para las velocidades de entrada de ciclón del orden de 15 m/s (50 ft /s), cuando el aire se encuentra a la presión atmosférica. Los valores antes mencionados de N_e se determinaron en condiciones en que se puede esperar muy poca floculación de polvo en la corriente de gas.

5.3. MOLINOS DE JAULA (CAGE MILL)

Muchos materiales pueden ser triturados unos por impacto y otros por compresión . ambos métodos aplican fuerzas a la partícula en suficiente medida para causar su quebrantamiento en dos o más pedazos.

La compresión se describe como la aplicación baja de una fuerza, esta realiza una presión o apretón . Las superficies entre las cuales la partícula es sujeta a compresión se asemejan al esfuerzo realizado por un freno.

Los trituradores de impacto, por otro lado, aplica la fuerza súbita y rápidamente. La gran velocidad de la superficie trituradora, cuando esta golpea la partícula o la gran velocidad a la cual la partícula se encuentra desplazando y golpea la superficie trituradora, aumentan el potencial de la reducción que se lleva a cabo.

Los trituradores de compresión más comerciales son los trituradores de mandíbulas, los trituradores giratorios, los trituradores de tambor. Entre los trituradores de impacto más conocidos encontramos el triturador de martillo y los molinos de jaula.

Partiendo de la oferta del mercado en cuanto a los diferentes trituradores que existen, encontramos en el Cage Mill, un equipo el cual nos da la confiabilidad requerida para que el sólido se encuentre en estado diluido, es decir, la fase de sólidos está tan dispersa dentro

del gas que la densidad de la suspensión es fundamentalmente la de la fase gaseosa en la individual. Por lo común, esta situación se presenta cuando la velocidad del gas en todos los puntos sobrepasa la velocidad inicial de asentamiento de los sólidos, y las partículas ascienden y son arrastrados continuamente por el gas.

Los molinos de jaula ([Cage mills](#)) son básicamente trituradores capaces de reducir y desintegrar, muchos tipos de materiales en pequeñas piezas. Ellos reducen materiales solamente por impacto. El rango de aplicación usual de los molinos de jaula esta entre 18 pulgadas para los más pequeños y 72 pulgadas de diámetro para los más grandes.

Un molino típico de jaula tiene solamente una parte que es móvil, la unidad del rotor. El material que ha ser triturado es alimentado hacia el centro del rotor, o jaula , a través de una pequeña tolva en la parte lateral del molino. La parte circular maciza (pins) de la jaula que gira, golpea el material y lo rompe transformando las partículas.

Las partículas son lanzadas frente a la caja de la jaula, donde ellas impactan contra los *breaker plates* y las partículas entre sí.

Cada impacto, contra los pins, los *breaker plates* y las partículas entre sí; contribuyen a reducir el tamaño original y hacen posible obtener más y numerosas piezas.

Con el tiempo el material finalmente escapa del molino de jaula, este ha sido completamente triturado o desintegrado. Las partes de trabajo, especialmente los braker

plates y las barras de la jaula, usualmente son hechas de acero al manganeso. El desgaste debido a su uso puede ser controlado en grado considerable por el cambio en la dirección de la jaula periódicamente.

5.3.1. Molino de jaula – Single Row. Si bien son clasificados como desintegradores secundarios, son diseñados para trabajo duro, para desintegración pesada, frecuentemente trabaja con materiales duros y altamente abrasivos, aunque su versatilidad hacen de ellos elementos valiosos para la reducción de muchos tipos de materiales.

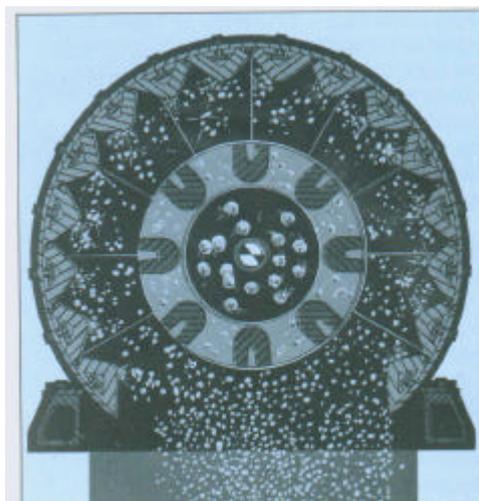


Figura 48. Molino de jaula single-row típico. Muestra el flujo de materiales durante la trituración

Ellos son particularmente útiles en la mejoría de arena y grava; y en la desintegración y trituración de todos los tipos de agregados, minerales y carbón.

Los molinos de jaula *Single Row*, están disponibles en rangos de tamaño de 24 a 72 pulgadas de diámetro (dimensiones referidas al diámetro externo de la jaula). La carcaza es, por supuesto, considerablemente más grande para dar un amplio espacio para el recorrido de las partículas, entre los pins de la jaula y los platos de impacto estacionarios. El rango de los diámetros de los pins varían desde 4 pulgadas a 10 pulgadas en las máquinas más grandes.

En general los molinos de jaula más grandes y el equipo de alimentación de tamaño más grande, aceptará la máxima capacidad que puede producir. La capacidad además depende de:

- a) La velocidad al cual el molino esta operando.
- b) El tamaño del material de la alimentación y su gravedad específica.
- c) Tamaño deseado del producto.

El tamaño entre los pines depende parcialmente del tamaño de la alimentación, por precaución no se diseñan demasiado cerca el uno del otro. Entre más uniforme la alimentación en el cage mill, mejor el servicio del molino y sus partes.

El método optimo de alimentación podría resultar al agitar el material, descargando el alimento a través de un equipo vibratorio al molino de jaula.

5.3.1.1. La alimentación. El tamaño del equipo de alimentación de un molino de jaula variará con el tamaño del molino y la dureza del alimento. Sin embargo la carga optima en muchos casos es de 20 a 40%, la carga de recirculación no esta limitada por la razón de reducción. La carga reciclada es controlada por una combinación de factores incluyendo la masa de la partícula, dureza y velocidad; y por la capacidad de la máquina , operando a una velocidad dada, a romper el tamaño de la partícula dada de dureza dada.

Materiales como la roca de cantera, granito y otros materiales duros, cuya trituración puede llegar a ser 100 por ciento menos ($\frac{5}{8}$ pulgadas ó hasta $\frac{3}{4}$ pulgadas). Otros materiales puede ser triturados a partículas tan pequeñas como $\frac{3}{8}$ pulgadas. Una carga de recirculación tan alta como 200 % ó aún más puede ser posible y razonable, es por esto que el equipo provee una versatilidad extrema en el producto final.

5.3.1.2. Operación. Se requieren potencias tan altas como 2 H.P. por tonelada cuando el producto es triturado a alta velocidad y tan bajos como $\frac{1}{2}$ H.P. por tonelada en baja velocidad.

La carga total en el molino de jaula, determinará la potencia requerida que debe ser encontrada. La parte giratoria del molino de jaula inevitablemente produce una cantidad fija de volumen de aire el cual debe ser controlado cuando se tritura materiales secos. La más pequeña cantidad de aire que es introducido al molino en el lado de la succión, es el mismo aire para dispersar.

5.3.1.3. Construcción. La siguiente es una explicación de cómo un molino de jaula single-row es hecha. Ver figura 49.

Todo empieza con un eje (1) en un extremo al cual es montado una polea y en el otro extremo un acople (2). El eje gira sobre dos cojinetes (3), los cuales están montados en un pedestal, unido a un sólido base estacionaria (5).

La jaula consta de un plato metálico montado en el eje(6), sobre ellas están montados unos pins macizos a igual distancia uno del otro (7). El otro extremo de los pins están unidos a un aro de acero (8), para formar una sola pieza soldada para adherir soporte y rigidez. Una caja de acero (9), cubre la jaula con un juego entre esta y los lados de la jaula. La caja al final esta diseñada con *breaker-plates* con forma de triangulo, el cual le da al interior de la caja una apariencia corrugada.

Una tolva soldada a la cara suministra materia prima, que atraviesa el lado de banda de la caja y deja caer al interior de los pines en velocidad, donde este es destrozado por los pines, *breaker plates* y el choque entre partículas, hasta que este es reducido en tamaño y cae a través de la apertura en el fondo de la caja.

5.3.2. Molino de jaula Multi – Row

Las máquinas *multi-row* operan con el mismo principio que un molino de jaula single-row lo hace y en la misma manera. Estos reducen el material, mediante impactos repetidos con pines de jaula y lanzando partículas unas con otras a altas velocidades, frente a la carcaza del molino de jaula y a otros pines.

Molinos *multi-row* consisten normalmente de un número constante de jaula: 2,4 ó 6, como muestra la figura 50.

Las jaulas están dispuestas concéntricamente, con cada jaula que gira velozmente en sentido contrario. Uno, dos o tres jaulas pueden ser montadas en cada eje. Dos motores son necesarios, ellos son montados en cada lado del molino, donde ellos giran en direcciones diferentes, es por esto que un molino de jaula emplean múltiples escenarios de reducción de impacto selectivo.

En el inicio del proceso el material es lanzado de jaula en jaula, las partículas se golpean unas a otras. Ellos finalmente son lanzadas fuertemente frente a los *breakers plates* que se distinguen en el interior de la carcaza. Después de muchos contactos violentos con los pines, los *breaker plates* y choques entre partículas son capturados por la parte exterior de la carcaza y son dejados caer a través de la salida de descarga en el fondo de la carcaza

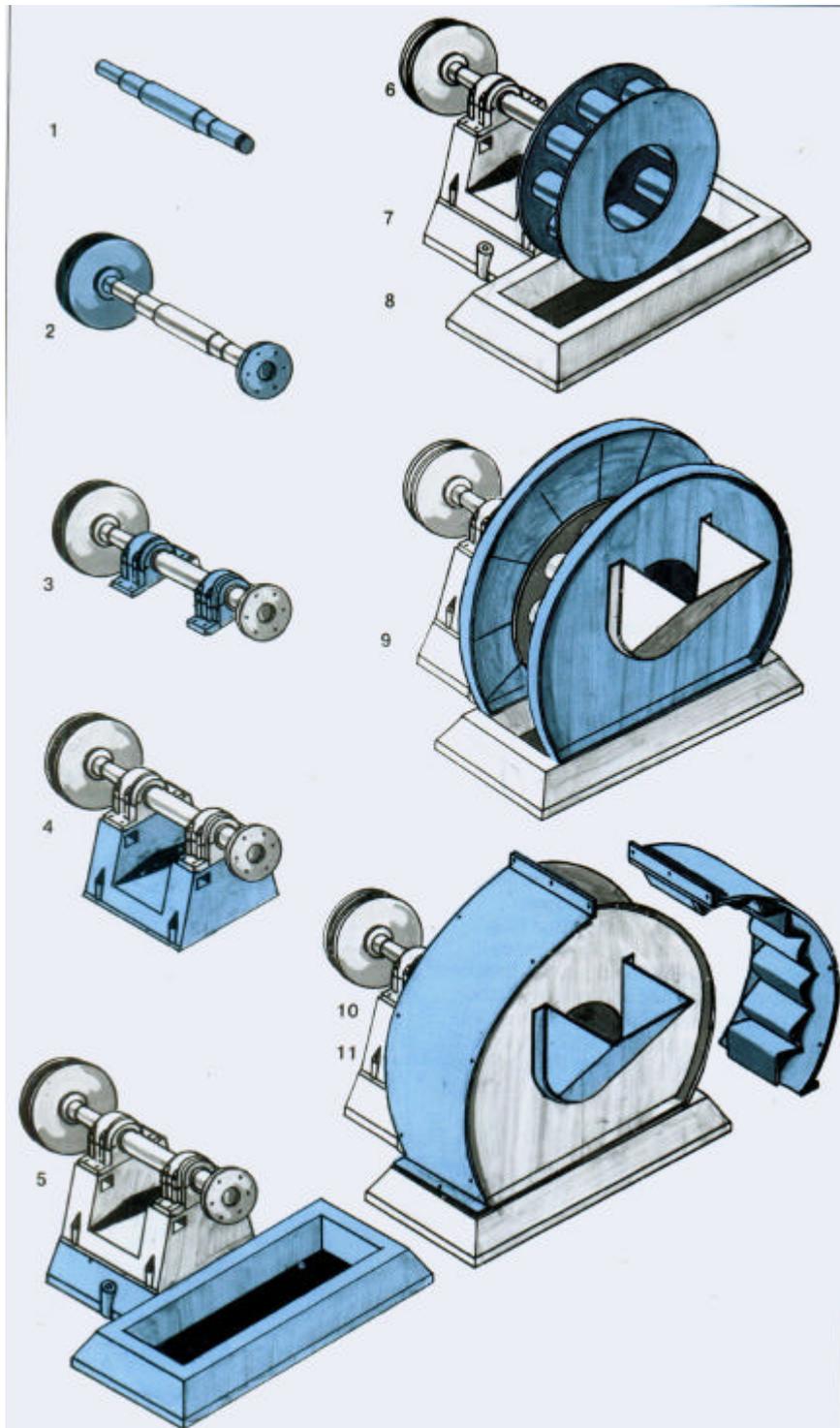


Figura 49 . Etapas en la construcción de un molino de jaula single-row

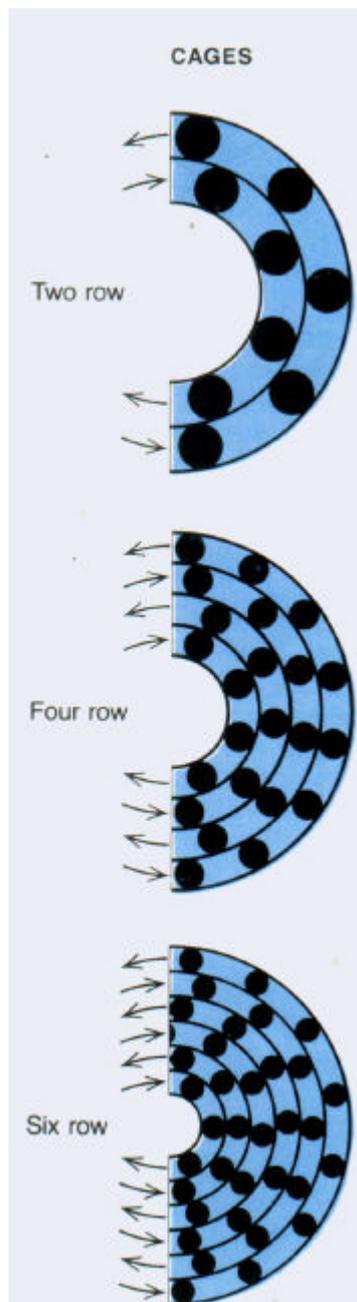


Figura 50. Numero de hileras en el molino. La cantidad de hileras hará que el material sea mas fragmentado.

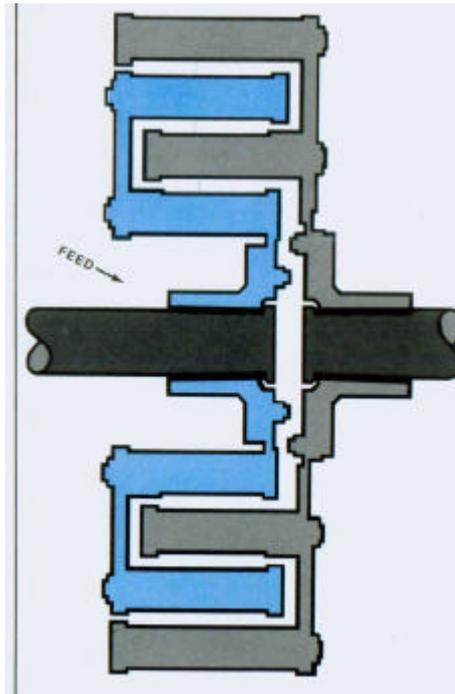


Figura 51. Corte longitudinal que muestra las hileras intercaladas

El máximo tamaño aceptable del material en la alimentación varía desde $\frac{1}{8}$ in en los más pequeños molinos de jaula multi-row hasta 4 in en los más grandes. Los materiales alimentados pueden ser reducidos a partículas cúbicas de particularmente cualquier grado de finura deseado, si es usado el equipo apropiado. Por ejemplo, un molino de jaula es capaz de reducir materiales tan gruesos como $\frac{1}{4}$ x 20 mesh a uno tan fino como 90 % que atraviesa una malla de 200 mesh.

En general, la gran cantidad de jaulas con el cual un molino es equipado, son capaces de reducir cualquier material específico.

Los molinos de pines y los *breaker plates* son hechas de aleaciones fuertes que resistan el uso, de cualquier modo, cuando sea conveniente reemplazarlos estos pueden ser llevarse a cabo fácilmente y a un bajo costo, con un mínimo de pérdida de tiempo. La vida de las partes móviles pueden aumentarse por el cambio en la dirección de las jaulas periódicamente.

Los molinos multi-row, ya sea de dos, cuatro ó seis hileras, son construidos como se explica a continuación. Ver figura 52.

Se inicia con dos ejes (1), en el extremo de cada uno en el cual esta montado una polea y en el otro extremo un acople (2). Los ejes giran en os cojinetes (3) los cuales están montados en un pedestales (4) unidos a una base estacionaria (5). La jaula consiste de un plato metálico montado en el eje (6) alrededor de cada lado están posicionados pines o barras metálicas a igual espacio una de otra (7). El extremo de los pins están unidos al aro metálico (8), para agregarle soporte y rigidez. Una lámina metálica (9) cubre las jaulas con un juego entre las caras y las jaulas.

La caja esta forrada con varios *breaker plates* (10), dependiendo de la aplicación. Una tolva esta montada a la cara de la caja suministra la alimentación que pasa a través y cae al interior de los pines que giran, donde este es repetidamente devastado por los pines de cada fila de jaula y por efecto de las fuerzas partículas escapan y regresan como se explico anteriormente, hasta que estas reducen su tamaño y cae a través de la apertura en el fondo de la caja.

5.3.3. Selección del molino de jaula. De las diversas alternativas que brinda el mercado, encontramos que el molino de jaula ofrece la mejor solución, para el problema de la desintegración del almidón húmedo de yuca, el cual necesita ser triturado para así lograr ser arrastrado por la corriente de aire caliente, y en ese estado de subdivisión facilitar la transferencia de calor necesaria para el secado instantáneo del material a desecar.

La diferencia entre este tipo de equipo (Trituradores de impacto) y los trituradores de compresión de acuerdo al material que se esta manejando, consiste en que el material tiende a tomar la forma de la superficie que lo presiona, imposibilitando la dispersión necesaria para el arrastre, transforma en terrones como de torta que hacen imposible el transito del almidón por el sistema de ductos del secador con transporte neumático

La empresa STEDMAN MACHINE COMPANY ofrece el modelo Y, triturador – mezclador, la cual posee las siguientes características:

1. Capacidades entre $1/2$ a 40 toneladas por hora.
2. Bajo perfil de diseño.
3. Bajos costos de operación
4. Rápido cambio de grueso a medio grado de trituración.

Las aplicaciones de este equipo se pueden resumir de la siguiente manera:

1. Materiales húmedos o secos.

2. Incrementar o disminuye la densidad de carga.
3. Combinación de mezcla y trituración.
4. Minimizan o maximizan la finura.

De las diferentes versiones que ofrece esta compañía del modelo Y, encontramos que el equipo con un diámetro máximo de jaula de 24” (ver cuadro 7) , ofrece unas características optimas para las necesidades del sistema de secado con transporte neumático, ya que el molino con dos jaulas maneja capacidades entre ½ ton hasta 8 ton por hora de material a triturar. La cantidad de almidón a manejar dentro del sistema es de 1 a 2 ton de material húmedo por hora.

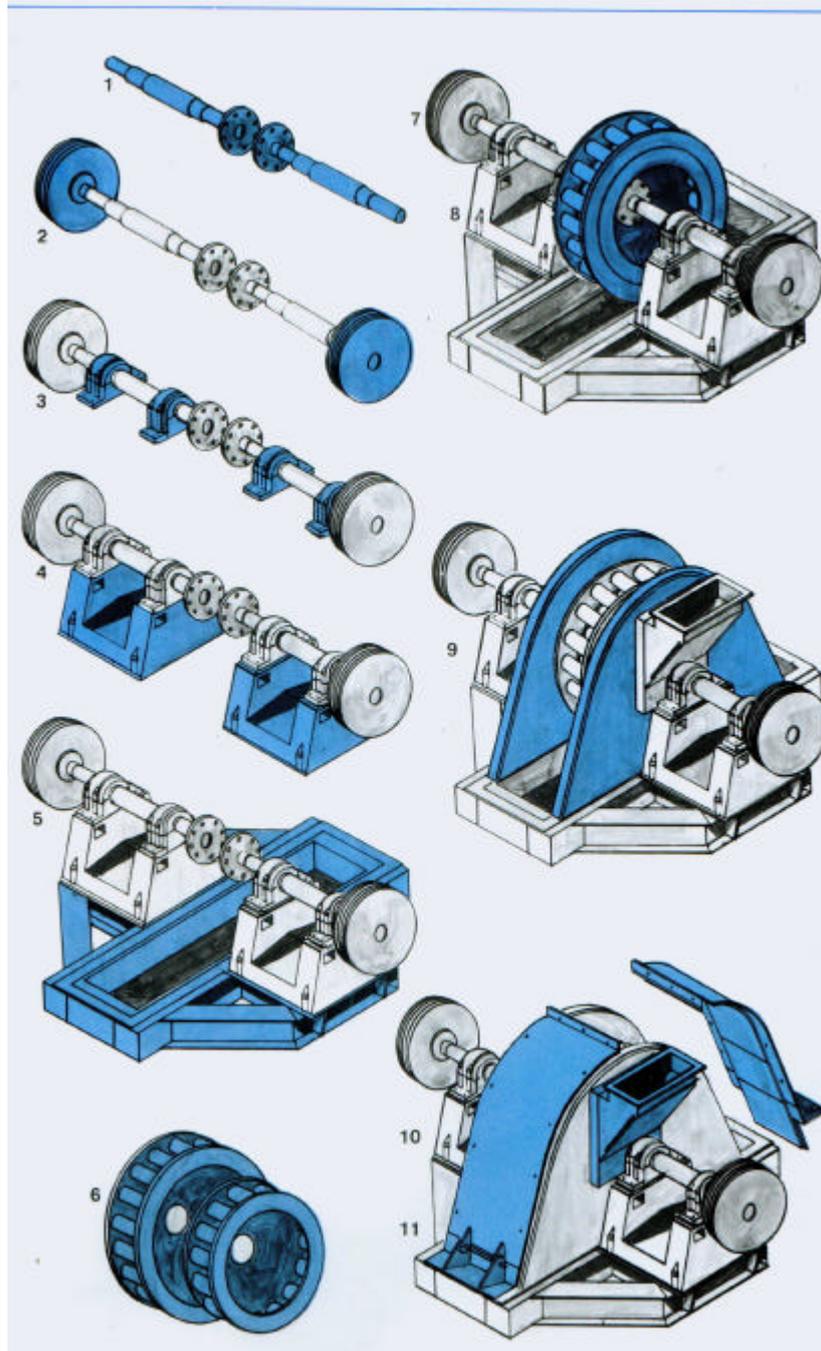


Figura 52. Despiece del molino y su montaje .

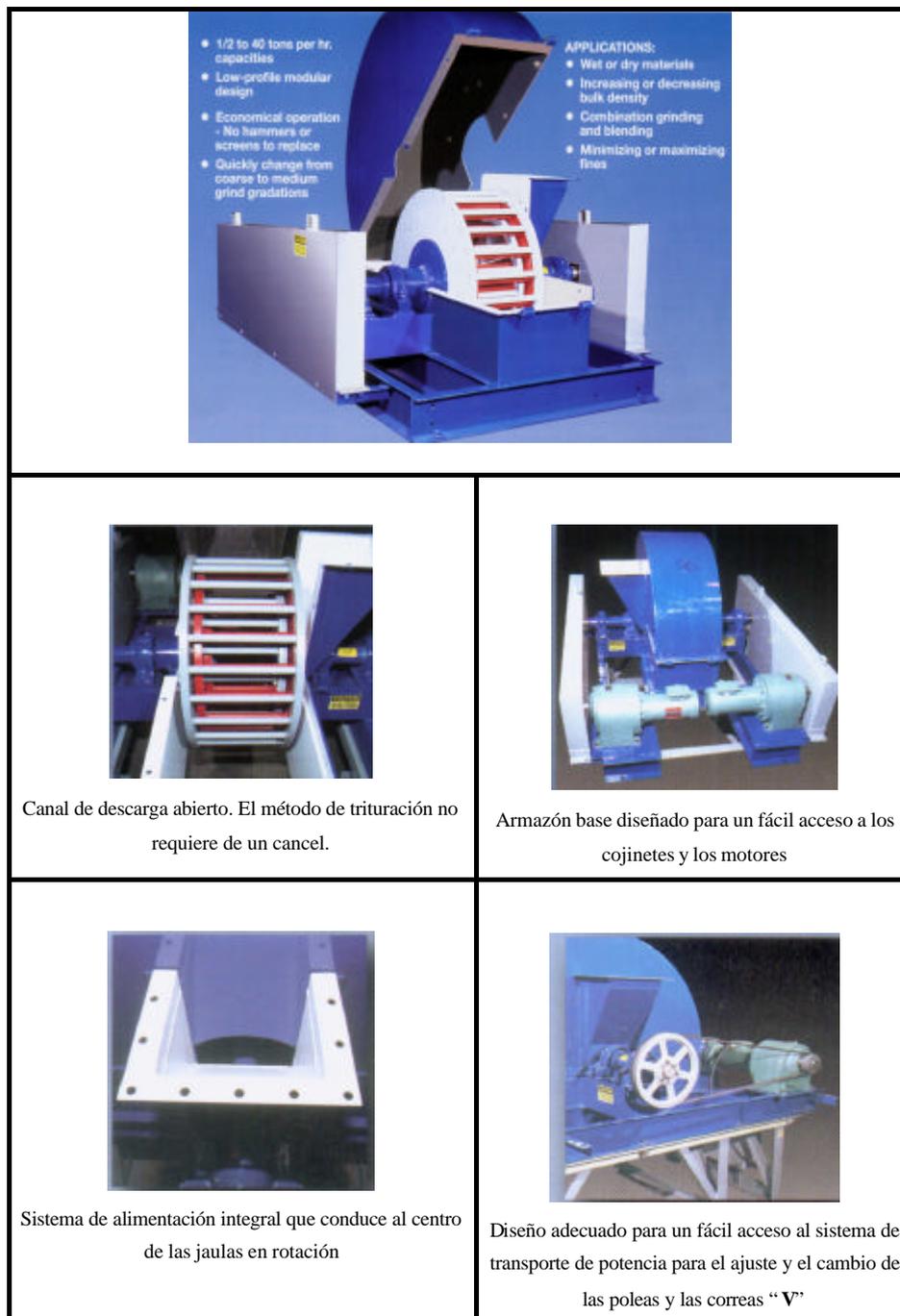


Figura 53. Secciones principales de un molino.

5.3.3.1. Molino de jaula Modelo “Y” especificaciones.

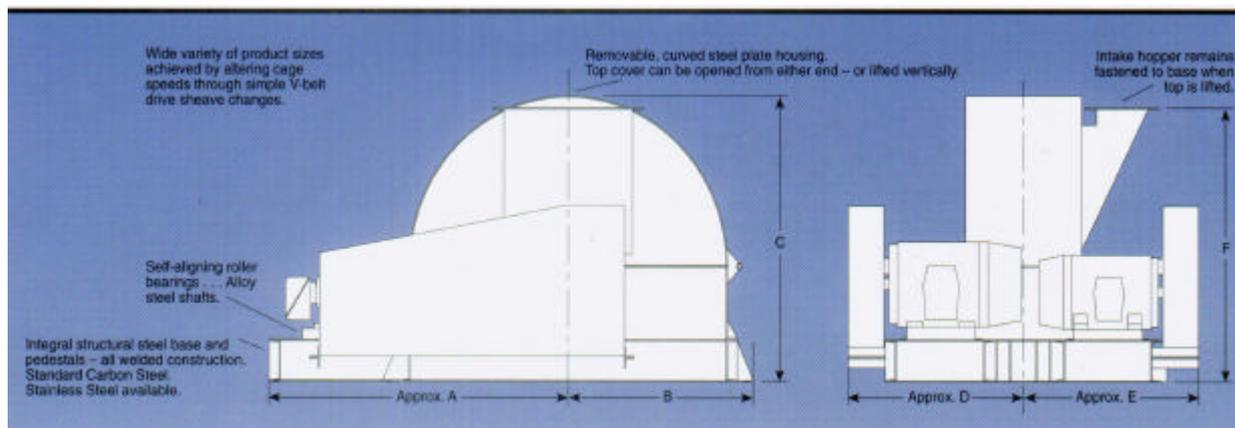


Figura 54. Especificaciones de las dimensiones del molino de jaula Modelo Y (Mezclador y Triturador)

Cuadro 7. Dimensiones generales de los diferentes molinos modelo Y*

SIZES	HORSEPOWER		SPEED RANGES RPM		OVERALL DIMENSIONS inches						WEIGHTS Pounds, Approx	
	Small Cage	Large Cage	Small Cage	Large Cage	A	B	C	D	E	F	2Row	4Row
24"	3-7 ¹ / ₂	5-10	200-1200	200-1000	50"	21 ¹ / ₄ "	32"	28 ¹ / ₂ "	28 ¹ / ₂ "	27 ¹ / ₂ "	1150	1300
30"	7 ¹ / ₂ - 15	10-25	200-1100	200-900	56"	28"	42 ³ / ₈ "	33 ¹ / ₂ "	33 ¹ / ₂ "	33"	1675	2000
42"	10-25	15-30	200-1000	200-800	66"	30 ¹ / ₂ "	55 ⁵ / ₈ "	45"	45"	51 ¹ / ₈ "	2870	3400
48"	30-40	40-60	150-900	150-700	73"	42 ¹ / ₄ "	64 ¹ / ₄ "	55"	55"	51 ¹ / ₈ "	4350	5000
60"	50-60	75-100	150-700	150-575	82"	38 ¹ / ₄ "	72 ¹ / ₄ "	62 ¹ / ₁₆ "	62 ¹ / ₁₆ "	60"	6500	8000

* Franja sombreada en amarillo: equipo seleccionado para la trituración del almidón húmedo. SIZES 24" (Diámetro máximo de la jaula)

Valiéndose del cuadro 7, se selecciona un molino que tienen un diámetro externo de la jaula más grande de 24”.

1. SIZES = 24”
2. HORDEPOWER = $3-7\frac{1}{2}$ ”
3. SPEED RANGES-RPM = 200 - 1100.
4. OVERALL DIMENSIONS
 - A = 50”
 - B = $21\frac{1}{4}$ “
 - C = 32”
 - D = $28\frac{1}{2}$ “
 - E = $28\frac{1}{2}$ “
 - F = $27\frac{1}{2}$ “
5. WEIGHTS = 1675 Pounds

El Molino de jaula modelo Y es un triturador selectivo, impacto controlado, molino de jaula, especialmente diseñado para clasificar miles de minerales y conglomerados, granos enteros, productos químicos, minerales, etc. Estos son particularmente recomendados a procesos húmedos, tan buenos como materiales secos al interior de procesos controlados, partículas de tamaño uniforme. El modelo Y tiene todas las ventajas de un gran molino de jaula a la fracción del costo.

5.4. DUCTO DE TRANSPORTE

5.4.1. Normas para tubería. La normalización en la industria de la tubería es la función de muchos grupos, entre los cuales están la American Society for Testing Materials (ASTM), la American National Standards Institute (ANSI), la American Water Work Association (AWWA) y el Pipe Fabrication Institute (PFI).

La ASTM tiene como mira la promoción del conocimiento de los materiales de ingeniería y la normalización de las especificaciones y de los procedimientos de ensayo. Esto se relaciona con las propiedades físico y químicas de los tubos como son entregados por las fábricas que los hacen.

La ANSI trata lo relacionado con los sistemas generales de tubos.

- a) Normaliza las dimensiones
- b) Asienta los esfuerzos admisibles en función de la temperatura
- c) Establece las formulas de trabajo para la determinación del espesor de las paredes en relación con la presión
- d) El material y las temperaturas
- e) Especifica el carácter general de la construcción de las válvulas y los accesorios
- f) Estudia soportes
- g) Anclajes
- h) Flexibilidad de un sistema de tuberías

- i) Confecciona un código o reglamento con las condiciones mínimas para la seguridad y garantía de un sistema

El FPI ha mostrado gran actividad en preparación de normas relacionadas con los trabajos de taller, especialmente en la normalización de la técnica para preparar los extremos de los tubos antes de soldarlos.

Hay tuberías de materiales ferrosos y no ferrosos . La clase ferrosa está representada por las de fundición y las de acero; latón, cobre, aluminio y plomo son metales no ferrosos que se emplean muchos en la tubería. En usos específicos han hallado aceptación general el hormigón, la madera, los productos cerámicos y los plásticos.

5.4.2. Designaciones de los códigos o reglamentos. Las especificaciones apropiadas de la ASTM indican las propiedades físicas y químicas de los materiales empleados en las tuberías

Tubos de acero al carbono: ASTM A106 y A53, los A53 y A106 se fabrican en los grados A y B; el grado B tiene resistencia mecánica más alta, pero es menos dúctil y, por ello, solo se admite el grado A para su doblado en frío o para hacer serpentines de hélice cerrada.

Acero al Carbono-Molibdeno: Puede adquirirse de los tipos A204 (con soldadura eléctrica por fusión); A335 (sin soldadura o costura), A369 (forjado, torneado y barrenado)

Acero al Cromo-Molibdeno: ASTM A335 grado P2 (para temperaturas hasta 950°F, se usa Cr 0.5% y Mo 0.5%), AA335 grado P12 (de 950°F a 1000°F, Cr 1% y Mo 0.5%)

5.4.3. Composición química

Cuadro 8. Composición química de ductos metálicos

Chemical composition natural gifts	C (MAX)	MN (MAX)	P (MAX)	S (MAX)	Si (MAX)	Ni	Cr	Mo	The others
TP304	0.08	2.00	0.04	0.03	0.75	8.00 -11.0	18.0 -20.0		
TP304L	0.035	2.00	0.04	0.03	0.75	8.00 -13.0	18.0 -20.0		
TP316	0.08	2.00	0.04	0.03	0.75	11.0 -14.0	16.0 -18.0	2.0 -3.0	
TP316L	0.035	2.00	0.04	0.03	0.75	10.00 -15.0	16.0 -18.0	2.0 -3.0	
TP321	0.08	2.00	0.04	0.03	1.00	9.00 -13.0	17.0 -19.0		Ti 5*C% ~0.60

5.4.4. Tablas de las dimensiones, pesos y presiones admisibles de tubería de acero inoxidable*

* Tomado del sitio web. <http://tube.pe.kr/seamlesstubes1.htm>

Tabla 4. Tablas de las dimensiones , pesos y presiones admisibles de tubería de acero inoxidable

O.D	W.T	Weight Kg/m		Internal pressure bar by each temperature(celsius)										
		304(L)	316(L)	20°C	100°C	150°C	200°C	250°C	300°C	350°C	400°C	calc t	O.D/I.D	m
6	1	0.125	0.125	390	306	275	256	242	230	219	211	0.800	1.36	1.00
6.35	0.89	0.121	0.122	309	242	218	203	192	182	174	167	0.690	1.28	1.00
6.35	1.24	0.158	0.159	496	389	350	326	308	292	279	269	1.040	1.49	1.00
8	1	0.174	0.175	281	221	199	185	175	166	159	153	0.800	1.25	1.00
8	1.5	0.243	0.244	492	385	347	323	305	290	277	266	1.300	1.48	1.00
9.53	0.89	0.192	0.193	198	155	139	130	123	117	111	107	0.690	1.17	1.00
9.53	1.24	0.256	0.257	310	243	219	204	193	183	175	168	1.040	1.28	1.00
9.53	1.65	0.324	0.326	455	357	321	299	282	268	256	246	1.450	1.44	1.00
10	1	0.224	0.225	220	173	155	145	137	130	124	119	0.800	1.19	1.00
10	1.5	0.318	0.319	379	297	267	249	235	223	213	205	1.300	1.35	1.00
10	2	0.399	0.400	556	436	392	366	345	328	313	301	1.800	1.56	1.00
12	1	0.274	0.275	181	142	128	119	112	107	102	98	0.800	1.15	1.00
12	1.5	0.392	0.394	308	241	217	202	191	181	173	167	1.300	1.28	1.00
12	2	0.498	0.500	447	351	315	294	278	264	252	242	1.800	1.43	1.00
12.7	0.89	0.262	0.263	146	114	103	96	90	86	82	79	0.690	1.12	1.00
12.7	1.24	0.354	0.356	226	177	159	149	140	133	127	122	1.040	1.20	1.00
12.7	1.65	0.454	0.456	327	256	230	215	203	192	184	177	1.450	1.30	1.00
14	1	0.324	0.325	154	120	108	101	95	91	86	83	0.800	1.13	1.00
15	1	0.349	0.350	143	112	101	94	89	84	80	77	0.800	1.13	
15	1.5	0.504	0.507	240	189	170	158	149	142	135	130	1.300	1.21	1.00
15	2	0.648	0.651	345	271	244	227	215	204	195	187	1.800	1.32	1.00
15.88	1.24	0.452	0.454	178	139	125	117	110	105	100	96	1.040	1.15	1.00
16	1.5	0.542	0.544	224	176	158	147	139	132	126	121	1.300	1.19	1.00
16	2	0.697	0.701	321	252	226	211	199	189	181	174	1.800	1.29	1.00
18	1.5	0.617	0.619	197	155	139	130	122	116	111	107	1.300	1.17	1.00
18	2	0.797	0.801	281	221	199	185	175	166	159	153	1.800	1.25	1.00
19.05	1.24	0.550	0.553	146	115	103	96	91	86	82	79	1.040	1.12	1.00
19.05	1.65	0.717	0.789	209	164	147	137	130	123	118	113	1.450	1.18	1.00
19.05	2.11	0.890	0.979	280	220	198	185	174	165	158	152	1.899	1.25	1.00
20	1.5	0.691	0.694	176	138	124	116	109	104	99	95	1.300	1.15	1.00
20	2	0.897	0.901	251	196	177	165	156	148	141	136	1.800	1.22	1.00
20	2.5	1.090	1.097	321	252	226	211	199	189	181	174	2.250	1.29	1.00
20	3	1.270	1.28	395	310	279	260	246	233	223	214	2.700	1.37	1.00
22	1.5	0.766	0.769	159	125	112	105	99	94	90	86	1.300	1.13	1.00

22	2	0.996	1.00	226	177	159	149	140	133	127	122	1.800	1.20	1.00
25	2	1.146	1.15	197	154	139	129	122	116	111	107	1.800	1.17	1.00
25	2.5	1.401	1.41	251	196	177	165	156	148	147	136	2.250	1.22	1.00
25	3	1.644	1.65	307	241	216	202	190	181	173	166	2.700	1.28	1.00
25	4	2.092	2.10	426	334	301	280	265	251	240	231	3.600	1.40	1.00
25.4	1.65	0.976	1.08	153	120	108	101	95	90	86	83	1.450	1.13	1.00
25.4	2.11	1.224	1.35	205	161	144	135	127	121	115	111	1.899	1.18	1.00
28	1.5	0.990	0.995	123	97	87	81	77	73	69	67	1.300	1.10	1.00
28	2	1.295	1.30	174	136	123	115	108	103	98	94	1.800	1.15	1.00
28	2.5	1.588	1.60	221	174	156	146	137	130	125	120	2.250	1.19	1.00
30	2	1.395	1.40	162	127	114	106	100	95	91	88	1.800	1.14	1.00
30	2.5	1.713	1.72	205	161	145	135	128	121	116	111	2.250	1.18	1.00
30	3	2.018	2.03	251	196	177	165	156	148	141	136	2.700	1.22	1.00
30	4	2.591	2.60	345	271	244	227	215	204	195	187	3.600	1.32	1.00
30	5	3.114	3.13	447	351	315	294	278	264	252	242	4.500	1.43	1.00
35	2	1.644	1.65	137	108	97	90	85	81	77	74	1.800	1.11	1.00
35	2.5	2.024	2.03	174	136	123	115	108	103	98	94	2.250	1.15	1.00
35	3	2.391	2.40	212	166	149	139	132	125	119	115	2.700	1.18	1.00
42	3	2.914	2.93	174	136	123	115	1.8	1.3	98	94	2.700	1.15	1.00

(O.D=Outside Diameter, W.T=Wall Thickness. Inch Size: 20ft/1pcs, Metric Size: 6M/1Cs)*

* La fila con la franja roja, especifica la presión máxima que puede soportar el conducto a diferente temperatura.

6. EVALUACIÓN ECONÓMICA

En este capítulo se presentarán todos los elementos que se consideran indispensables en el análisis económico de un proyecto y que son la base para realizar la evaluación económica.

Al principio se determinarán los costos totales del proyecto, los cuales se pueden clasificar de forma genérica como costos de producción, de administración y de ventas. Se aclarará que otros costos importantes son los financieros, pero solo se incurren en ellos al pedir un préstamo, ya que consisten en los intereses que se pagan periódicamente por la cantidad prestada, por lo que se podrá o no tener este tipo de costos dentro de una empresa.

Las inversiones que una empresa requiere para operar son básicamente tres: inversiones en activo fijo y diferido, ambas sujetas a depreciación y amortización, y el tercer tipo de inversión es el capital de trabajo, que es de naturaleza líquida o circulante, por lo que no está sujeto a recuperación por cargos de depreciación y amortización.

Las leyes tributarias de casi todos los países permite la recuperación de todo tipo de activo, ya sea fijo o diferido, por medio del mecanismo fiscal de la depreciación y la amortización. Los porcentajes que se recuperan cada año están dictados por la ley tributaria. Con fines de fomento económico, el gobierno puede permitir una recuperación más rápida de los activos

aplicando la depreciación acelerada, la cual solo podrá usarse mediante acuerdos por escrito con el gobierno.

Uno de los aspectos vitales del estudio es la determinación de la tasa mínima aceptable de rendimiento (TMAR), ya que este será el punto de comparación cuando llegue el momento de la evaluación económica. No es lo mismo la TMAR cuando existe un solo inversionista, que cuando el capital que conforma la empresa se integra con fondos provenientes de varias fuentes. En este caso, la TMAR se calcula como un promedio ponderado del porcentaje de aportación de capital y la TMAR de cada fuente individual que aporte capital para la empresa. Cuando se pide un financiamiento o préstamo es necesario contar con los métodos que permitan calcular tanto el pago de intereses como el de capital. No hay que olvidar que la ley tributaria permite deducir de impuestos los intereses (costos financieros), no así el pago de capital. Es claro que cuando se pide un préstamo se modifica también el rendimiento de la inversión.

Otros dos cuadros que presentan información importante son el estado de resultados (o de pérdidas y ganancias), y el balance general. El estado de resultados es un condensado de una serie de información que se obtuvo con anterioridad. Muestra justamente las pérdidas y ganancias en que pudo haberse incurrido en la operación de la empresa, y produce como resultado los flujos netos de efectivo que se utilizarán en la evaluación económica. El balance general muestra el valor real de la empresa hacia el final de un periodo contable.

6.1. ANÁLISIS ECONÓMICO

6.1.1. Determinación de los costos de producción

6.1.1.1. Bases de cálculo adoptadas para obtener el costo de producción

1. **Materia Prima:** Es el material básico que se emplea en el proceso de elaboración de almidón de yuca. El costo de la materia prima para el proyecto se ha calculado con base en la información directa proporcionada por COAPRACAUCA (Cooperativa Productores de Almidón del Cauca), la cual compra la tonelada de yuca fresca a \$250.000 pesos (Diciembre 2001)

El volumen de operación de la planta en Ton de almidón, es de:

1.1 Ton/hr = 5808 Ton/año

La relación de yuca almidón es de 5 kilos de yuca a 1 kilo de almidón, es decir, que para producir 1.1 Ton son necesarias 5.5 Ton de yuca. Anualmente se necesitan \$7'260.000.000 en yuca fresca, es decir, 29.040 toneladas de yuca al año.

La base de calculo es de \$1'250.000 / Ton de almidón

2. **Electricidad:** El costo total de electricidad para el proyecto se calculó con base en la carga total conectada y de acuerdo con las tarifas eléctricas vigentes, sector residencial.

La carga eléctrica de la planta se distribuye como se muestra en la tabla 5.

Tabla 5. Capacidad eléctrica total requerida

Motor de:	Número de unidades	KW por unidad	KW totales
Ventilador centrífugo	1	138	138
Cage Mill	2	7.46	14.92
Sub-total			152.92
Imprevistos (5% del total)			7.646
Total			160.566
Carga total conectada			160

Demanda contratada = 60% de la carga total = 96.33 KW

Tarifa = \$173.48 / KW-hr.

96 KW x 16 h/día x 330 días / año x 1 año/12 meses = 42.240 KW-h/mes

Cargo por demanda máxima:

$$\$173.48 / \text{KW-hr.} \times 96 \text{ KW-hr.} \times (1.025)^2 = \$17.497,19 / \text{mes}$$

Cargo por energía consumida

$$\$173.48 / \text{KW-hr.} \times 42.240 \text{ KW-hr.} / \text{mes} = 7'327.795,2 \times (1.025)^2 = \$7'698.764,83/\text{mes}$$

Costo mensual = Costo por energía consumida + Costo por demanda máxima

$$= \$7'716.262,02/\text{mes}$$

$$\text{Costo por tonelada de almidón} = \$7'716.262,02 / 528 \text{ Ton} = \$14.614,13 / \text{Ton}$$

3. Combustible: El combustible que se utilizará será gas natural (CH_4). Su consumo (?) se ha calculado claramente en la sección 4.6 de este documento.

$$\begin{aligned} ? &= 73.6 \text{ (Kg } \text{CH}_4 \text{ / hr.)} = 110 \text{ (m}^3 \text{ / hr.)} \times 16 \text{ (hr. / día)} \times 330 \text{ (días / año)} \times 1 \text{ año} / 12 \\ \text{meses} &= 48400 \text{ m}^3 / \text{mes} \end{aligned}$$

$$\text{Tarifa} = \$298/\text{m}^3$$

$$\$298/\text{m}^3 \times 48400 \text{ m}^3 = \$14'423.200 / \text{mes}$$

$$\text{Costo por tonelada de almidón} = \$14'423.200 / 528 \text{ Ton} = \$27.316,66 / \text{Ton}$$

4. Mano de obra directa: El costo de la mano de obra directa se presenta en la tabla 6.

Debe aclararse que el costo de mantenimiento sólo se incluyen materiales y refacciones para la maquinaria y equipo.

Tabla 6. Costo de la mano de obra directa

	Número de plazas por día		Sueldo mensual por plaza	Sueldo total anual + 30% prestaciones
	1 turno	2 turno		
Operador 1	1	2	\$342.880	\$10'697.856
Operador 2	1	2	\$342.880	\$10'697.856
Total				\$21'395.712

Mantenimiento: El mantenimiento preventivo que se planea llevar a cabo durante las operaciones de manufactura del almidón, se encuentra representado en un porcentaje sobre el costo de los equipos cuando estos operan a toda su capacidad. Debe aclararse que el costo de mantenimiento sólo se incluyen materiales y refacciones para la maquinaria y equipo. Los sueldos de los mecánicos y los técnicos se incluyen en la mano de obra indirecta. Véase la tabla 7.

Tabla 7. Costos de mantenimiento.

Concepto	Costo del equipo (pesos)	Costo anual de mantenimiento (pesos)
Cage Mill	15'000.000	300.000
Sistema de transporte y recolección	38'942.360	778.847,2
Quemador	8'964.480	179.289
Ventilador	39158.120	783.162,4
Fletes y seguros	11435.760	228.715,2
Total		2'270.013,8

5. Seguros e impuestos de la planta: Se ha calculado como 1% de la inversión fija total.

El costo total por este concepto será de

\$1'637.584,32

A continuación se presentan los costos de producción en la tabla 8, que previsiblemente regiría en estos primeros cinco años de operación de la planta.

6.1.2. Determinación de la inversión inicial total, fija y diferida

1. Gastos de instalación de los equipos: Se considera 15% del costo de los equipos. Incluye montaje, puesta en marcha, instrucción del personal y supervisión de la planta durante el periodo de normalización de las operaciones productivas. Esto es

\$15'309.600.

2. Obra Civil: Estructura de soporte A.C. totalmente pintada con 9 mils de pintura epóxica. 1500 Kg

\$7'656.000 (Con IVA)

3. Fletes, seguros, impuestos y gastos aduanales: Correspondientes al traslado de los equipos desde su lugar de origen hasta el punto donde se instalará la planta. Se considera este costo como parte total de los equipos.

\$ 11'435.760

4. Costo de maquinaria y equipos: Véase la tabla 9

Tabla 8. Costos de producción

Tabla 9. Costos de maquinaria y equipos

Descripción	Costo Unitaria	Costo total puesto en planta
Cage Mill	15'000.000	21'000.000
Sistema de transporte y recolección	38'942.360	44'378.120
Quemador	8'964.480	8'964.480
Ventilador	39'158.120	39'158.120
Total	102'064.960	113'500.720

Ingeniería del proyecto: Se estima en un 10% de los activos fijos totales

\$13'646.536

5. Supervisión de la construcción: Se estima en un 10% de la del costo físico de la planta

\$13'646.536

En la tabla 10 se resume la inversión total correspondiente al proyecto.

6.1.3. Depreciación y amortización de la inversión fija: en la tabla 11 se indica cuáles serán los cargos anuales por depreciación de activos tangibles y amortización de activos intangibles. Los porcentajes aplicables deben apearse estrictamente a las cifras señaladas en las leyes tributarias de cada país.

6.1.4. Información de los costos variables y costos fijos de la inversión: Ver tabla 12.

Tabla 10. Presupuesto de la inversión fija del proyecto.

6.1.5. Financiamiento de la empresa. Determinación de la tabla de pago de la deuda.: Ver tabla 13.

Tabla 13. Tabla de pago del préstamo refaccionario

Tabla 11. Depreciación y amortización de la inversión fija

Tabla 12. Costos variables y costos fijos de la inversión

6.1.6. Presupuesto de ingresos por ventas. Teniendo en cuenta la producción expresado en la sección 6.1.1.1. y los precios de ventas mencionados en la tabla 14 se ha calculado el presupuesto de ingresos por ventas para los primeros cinco años de operación del proyecto. Véase tabla 14.

Tabla 14. Presupuesto de ingresos por ventas

6.1.7. Estado de resultados: En la tabla 15 se muestran el estado de resultados y la obtención de los flujos netos de efectivo (FNE), considerando el financiamiento obtenido.

6.2. CALCULO DE LA TIR CON FINANCIAMIENTO

Al hacer la determinación de la TIR habiendo pedido un préstamo, habrá que hacer ciertas consideraciones. La primera de ellas, cuando se calcula la TIR y hay financiamiento, es que sólo es posible utilizar el estado de resultados con flujos y costos inflados, ya que estos se encuentran definitivamente influidos por los intereses pagados (costos financieros), pues la tasa del préstamo depende casi directamente de la tasa inflacionaria vigente en el

Tabla 15. Estado de Resultados

momento del préstamo, por lo que sería un error usar FNE constantes (inflación cero) y aplicar estos a pago a principal y costos financieros, alterados por la inflación.

La segunda consideración importante es que para calcular la *TIR*, la inversión prevista ya no es toda la inversión fija, sino que será necesario restar a la inversión total la cantidad prestada. En el caso práctico que se sigue, esto equivale a \$163'758.432 (inversión fija) menos \$98'255.059 (cantidad prestada), igual a \$65'503.372 de inversión neta de los accionistas. Esto es así no porque no se inviertan \$163'758.432 en activos fijos, sino que el desembolso inicial para los promotores del proyecto es de sólo \$65'503.372, y en el propio estado de resultados se muestra como se van pagando los \$98'255.059 restantes.

Una última consideración es que el préstamo se da un año de gracia. El primer año sólo se pagan intereses y no capital, como lo muestra la tabla 13; entonces, al término del quinto año, cuando se hace la evaluación, aún se deben \$52'039.709, los cuales habrá que sumar a la aportación propia, por que es un capital no pagado. Tomando los *FNE* de la tabla 14, el cálculo de la *TIR* será:

$$\begin{aligned} \$110,642,882.78 = & \frac{3593426571.76}{(1+i)} + \frac{2,791,8618}{(1+i)^2} + \frac{3,017,518,552.10}{(1+i)^3} + \\ & \frac{3,260,201,115.93}{(1+i)^4} + \frac{3,522,343,781.63}{(1+i)^5} \end{aligned}$$

$$i = TIR = 30\%$$

Como nota final se puede decir que si se acepta el proyecto financiado, ya que la *TIR* del proyecto es mayor que la *TMAR* de inversionista, la cual se determina de la siguiente manera aplicando el método del costo de capital ponderado.

Cuando el capital proviene de varias fuentes, es decir, a través de los accionistas de la empresa y mediante un préstamo financiero, debe calcularse la *TMAR* de esa empresa como el promedio ponderado de las aportaciones porcentuales y *TMAR* exigidas en forma individual.

Dueños de la empresa: $TMAR = 8\% \text{ inflación} + 25\% \text{ al riesgo} + 0.08 \times 0.25 = 0.35$

Banco : $TMAR = 20\%$

Accionista	% aportación	<i>TMAR</i>	<i>Ponderación</i>
Inversionista	0.4	0.35	0.14
Institución financiera	0.6	0.2	0.12
	<i>TMAR</i> global mixta		0.26

La *TMAR* del capital total es de 26%; esto significa que es el rendimiento mínimo que deberá ganar la empresa para pagar el 35% sobre los \$65'503.372 y el 20% de interés a la aportación bancaria de \$98'255.059.

$$TIR > TMAR$$

7. CONCLUSIONES

Entre los aspectos más importantes para la obtención del almidón de yuca se estableció que la concentración de del almidón varía de acuerdo con la edad del cultivo, con el tipo de suelo, el clima y la variedad.

Se logran proporciones importantes de almidón en la raíz de la yuca cuando se siembra en climas cálidos, se utilizan suelos sueltos, profundos, de buena fertilidad , bien drenados; se utilizan variedades seleccionadas y se cosecha oportunamente.

De la familia de los carbohidratos, el almidón ocupa el segundo lugar en abundancia, después de la celulosa , pero de esta solo un 11.4% de la producción mundial pertenece a la yuca. Respecto a los productores mundiales Colombia ocupa el puesto 16 con solo 1.9 millones de toneladas métricas; esto nos indica que el cultivo de yuca es bajo técnicamente, ya que solo se obtiene por hectárea una producción promedio 9 toneladas, el mercado del almidón de yuca esta subutilizado, quedando muy por debajo de la producción promedio de países vecinos como Brasil, los cuales poseen iguales características respecto al clima y suelos.

El almidón de yuca es un material sensible al calor, debido a sus propiedades reológicas; por esta razón, durante el proceso de manufactura, transporte y almacenamiento, se debe tener especial cuidado para que este no alcance su temperatura de gelatinización en el secado y evitar la proliferación de sólidos en suspensión durante su almacenamiento, ya que se vuelve explosivo.

El estudio de la forma como se deseca el sólido, se basa en el mecanismo interno de flujo del líquido o vapor y en los efectos de las condiciones externas como temperatura y humedad del aire, estado de subdivisión del sólido, área de contacto con la superficie caliente y los sólidos mojados. A un menor tamaño de la partícula envuelta en la corriente de arrastre, habrá un mayor contacto sobre la superficie total de dicha masa y por consiguiente una mayor transferencia de calor y de masa.

Para el balance de calor y de masa en el secador, la cantidad de aire necesario y la cantidad de sólidos a gas; se fijan de acuerdo con la humedad del sólido, la temperatura del aire y la humedad del aire a la salida del secador.

Existen muchos equipos disponibles para la desecación de sólidos, cual sea la aplicación que se requiera, pero solo una adecuada selección permite adquirir la solución más viable desde el punto de vista de operación y económico. Es por eso que cobra mucha importancia el análisis de los equipos más adecuados con criterios fácilmente evaluables, como las propiedades del material que se va a manejar, características de desecación del

material, circulación del material que entra y sale del secador, cualidades del producto, problemas de recuperación, instalaciones disponibles en el sitio de ubicación propuesto.

De los diversos equipos utilizados para la desecación de sólidos, el secador con transporte neumático ofrece características tales como, rapidez en la operación de secado, manejo de materiales granulados en suspensión, sensibles al calor, fácilmente oxidables, explosivos o inflamables, que lo hace desde el punto de vista de operación apropiado para las necesidades de este proyecto, permitiendo superar las deficiencias técnicas en el proceso de secado de las empresas dedicadas a la producción de almidón de yuca en la costa atlántica.

Para los transportadores neumáticos, la elección del alimentador correcto, para asegurar una minuciosa dispersión inicial de los sólidos en el gas, constituye un factor de primordial importancia. La disposición del ventilador, tiro inducido, y el uso de separadores ciclón, son de vital importancia para aumentar la eficiencia del secado y evitar pérdidas del producto a la atmósfera, por el efecto del arrastre.

El principio de funcionamiento del secador es el transporte neumático, donde el requisito fundamental en todas las aplicaciones, es que la operación se complete en forma instantánea, por tal efecto, los ventiladores tipo turbina, permite mantener un flujo continuo de aire para el arrastre de las partículas, y permite completar el trabajo en todos los sólidos presentes en dicho instante, por otro lado, es una solución adecuada para vencer las altas caídas de presión en el sistema.

El análisis y la posterior evaluación económica, determinan una tasa interna de retorno (TIR), igual a 30%, la cual resulta muy útil a la hora de evaluar la participación en la realización del proyecto, además resulta atractiva por ser superior en diez puntos porcentuales a la TMAR, para realizar el aporte de capital. El análisis de los costos refleja el deseo de aproximarse a las condiciones reales de negociación o de inversión, y es posible que estos valores varíen un poco, pero representan una buena aproximación para efectos de estudio de la inversión.

Son muchas las áreas de ingeniería que toca este proyecto, y cada una es de gran importancia. Los conocimientos relacionados con el estudio del secador neumático en su conjunto es de difícil obtención ya sea por fuente directa, , visitas a empresas, entrevistas, etc; o indirecta, ya que la literatura resulta muy escasa. Es por eso que el desarrollo y presentación de esta propuesta, viene marcada por el estudio de los elementos que constituyen el sistema de secado, ventiladores, trituradores, separadores de fase ciclón, ductos.

8. RECOMENDACIONES

Incentivar e instruir a los cultivadores de yuca, para que optimicen e incrementen la producción de yuca por hectárea. Esto se puede hacer a través de programas que brinda el ICA y el CIAT en todo el país.

La industrialización de la yuca es una alternativa para mejorar la demanda del tubérculo en la Costa Atlántica, ya que en la actualidad las rallanderías y productores de almidón están agrupados en la zona del valle del cauca. Esto ayuda a mejorar la calidad de vida de los agricultores de yuca de la zona.

Montar una rallandería con toda la técnica requerida en la Costa Atlántica es una muy buena alternativa de negocio, tanto para quien la implementa, como para los campesinos de la región que se dedican al cultivo de la yuca.

Instituir proyectos de investigación que estén encaminados al estudio de los usos industriales de almidón de yuca, estos proyectos estarían dirigidos por facultades de Ingeniería de Alimentos, Agronomía; vinculando a la empresa privada, para la financiación de los mismos y aumentar de este modo la demanda del almidón de yuca.

La realización de un software, el cual permita simular el comportamiento de las variables que intervienen en el proceso de secado para diferentes condiciones de operación. Además el software estaría en la capacidad de poder determinar las dimensiones del secador y los requerimientos específicos de una planta determinada.

En el dispositivo desecador de almidón de yuca, se pueden observar los ciclones, en su parte superior, estos tienen un ducto; el cual sirve para que a través suyo se evacuen el aire húmedo que ha sido separado del sólido. Este ducto se comunica con un ventilador centrífugo a través de un acople, este es el encargado de realizar la succión. Se recomienda colocar filtros entre la salida de los ciclones y la entrada del ventilador, ya que esto contribuye primero a no contaminar el medio ambiente con la polución que emana de los ciclones y segundo protege al ventilador y le alarga la vida útil.

Para una fábrica de almidón de yuca que desee adoptar un secador con transporte neumático, se recomienda que el montaje del mismo se realice en el sistema de bloques, para que faciliten el ensamble del mismo y mejore la capacidad para realizarle mantenimiento a los dispositivos que conforman el secador.

El agua es un insumo de mucha importancia para la manufactura del almidón de yuca, es por eso que es de vital importancia garantizar el suministro del agua y su posterior tratamiento. También es importante que dentro de la variedad de combustibles y sistemas que existen para generar energía, preferir el gas natural para realizar el proceso de combustión y por eso es necesario tenerlo en cuenta en los costos de la inversión fija.

BIBLIOGRAFIA

1. ALARCON, Freddy y DUFOUR, Dominique. Almidón agrio de yuca en Colombia. Colombia : CIAT No. 268, 1998. Tomo 1: Producción y recomendaciones, p 3-15.
2. BACA, Gabriel. Evaluación de proyectos. México : Mc Graw Hill, 1995, p 133-208.
3. BANCHERO, Julius T. BADGER, Walter L. Introducción a la ingeniería Química. México : Mc Graw Hill, 1994, p 253-305
4. ENCICLOPEDIA COMPLETA DE FARMACIA. Madrid : Casa editorial Calleja, 1975. p 188-205.
5. ENCICLOPEDIA DE TECNOLOGÍA QUÍMICA. México : Unión tipográfica editorial Hispano-americana, 1975, p 3-15.
6. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACIÓN, Tesis y otros trabajos de grado Bogota: ICONTEC., 1996. 132 p. NTC. 1486.
7. JENNINGS, Burgess H – LEWIS, Samuel R., Aire acondicionado y refrigeración. México : Compañía Editorial Continental, S.A., 1971, p 41-112.

8. MARKS, Manual del Ingeniero Mecánico. México : Mc Graw Hill, 1989 : Vol. 1. No. 6, p. 6-34 – 6-45
9. PERRY, Manual del Ingeniero Químico. México : Mc Graw Hill. Vol. 2, 1996. 20-4 a 20-15p.
10. WARK, Kenneth. Termodinámica. México : Mc Graw Hill, 1996, p 514-537

ANEXOS

ANEXO A. Clasificación de los secadores, basados en los materiales manipulados.

Cuadro 1.

	Líquidos	Lechadas	Pastas y lodos	Polvos de movimiento libre	Sólidos granulares Cristalinos o fibrosos	Sólidos grandes, formas y contornos especiales	Láminas continuas	Láminas discontinuas
<p>Tipo de secador</p> <p>De bandejas y compartimentos. Tipo directo operación por lotes.</p>	<p>Soluciones verdaderas y coloidales: emulsiones. Ejemplos. Soluciones de sales inorgánicas extractos, leches, sangre, licores de desecho, lactes de caucho, etc.</p> <p>No es aplicable</p>	<p>Suspensiones bombeables: ejemplos. Lechadas de pigmentos, jabón y detergentes, carbonato de calcio, bentonita, suspensión fluida de arcilla, concentración de plomo, etc</p> <p>Para una producción, por lotes muy pequeña. Deseccación en laboratorios.</p>	<p>Ejemplo: Tortas de prensa de filtrar, lodos de sedimentación, sólidos centrifugados, almidón, etc.</p> <p>Apropiado para operaciones por lotes. A grandes capacidades los costos de inversión y operación son elevados. Tiempos de desecación prolongados.</p>	<p>Malla de tamiz 100 o menores. De movimiento relativamente libre en estado húmedo. Polvoriento cuando están secos, ejemplo: precipitados, centrifugados, cements, arcillas, pigmentos.</p> <p>La formación de polvo puede constituir un problema. Véanse las observaciones bajo pastas y lodos.</p>	<p>Mayores que malla 100. Ejemplo: Fibra de rayón, cristales de sales, arena, minerales, tiras de papa, hules sintéticos.</p> <p>Apropiado para operaciones por lotes. A Grandes capacidades los costos de inversión u operación son elevados. Tiempo de desecación prolongados</p>	<p>Ejemplo: Alfarería, ladrillos, tortas de rayón, casquillos de escopeta, sombreros, objeto pintados, madejas de rayón, maderas.</p> <p>Véanse las observaciones para sólidos granulados.</p>	<p>Papel, telas impregnadas, paños, celofán, láminas de plástico</p> <p>No es aplicable</p>	<p>Chapa de madera, láminas de cartón comprimido, impresiones fotográficas, cuero, láminas de hule espuma.</p> <p>Véanse los comentarios bajo sólidos granulados.</p>
<p>Por lotes de circulación directa. Tipo directo operación por lotes.</p>	No es aplicable	No es aplicable	<p>Apropiado solo si el material se puede preconformar. Adecuado para operaciones por lotes. Tiempos de desecación más corto que los desecadores de bandeja.</p>	No es aplicable	<p>Por lo general, no es apropiado para mantenerles más pequeños que la malla 30. Adecuado a capacidades reducidas y operación por lotes</p>	<p>Útil primordialmente para objetos pequeños.</p>	No es aplicable	No es aplicable.
<p>De túnel. Continuo de bandejas. Tipo directo, operación continua.</p>	No es aplicable	No es aplicable	<p>Apropiado para producciones a pequeña y gran escala.</p>	<p>Véanse las observaciones bajo pastas y lodos. Aplicable al turbo secador vertical</p>	<p>Esencialmente a gran escala, desecación semi continua en bandejas.</p>	<p>Apropiado para una amplia variedad de formas y contornos. La operación puede ser continua Tiene un uso muy difundido</p>	No es aplicable	<p>Apropiado para cuero láminas de cartón comprimido, chapas de madera.</p>
<p>Continuo de circulación directa. Tipo directo, funcionamiento continuo.</p> <p>Rotatorio directo. Tipo directo operación continua</p>	<p>No es aplicable</p> <p>Aplicable con recirculación del producto seco</p>	<p>Solo el secador de filtros para cristales es adecuado</p> <p>Aplicable con recirculación del producto seco</p>	<p>Apropiados para materiales que se pueden preconformar. Maneja grandes velocidades. El rotor Louvre requiere la recirculación del producto seco</p> <p>Apropiado solo si el producto no se adhiere a las paredes y no forma polvo. Es probable que la recirculación del producto evite su adhesión.</p>	<p>En general no es aplicable, excepto el rotor-Louvre en ciertos casos.</p> <p>Apropiado para la mayoría de los materiales y las capacidades a condición de que la producción de polvo no sea demasiado notable.</p>	<p>Por lo común, no es aplicable para materiales con tamaño menores con malla 30. El material no se somete a volteo excepto en el secador rotor-Louvre. Este último funciona a temperaturas más elevados. Apropiado para la mayoría de los materiales y las capacidades. La abrasión de polvos o cristales reduce su utilidad.</p>	<p>Apropiado para objetos más pequeños que se pueden cargar unos sobre otros. Se utiliza para transportar materiales a través de zonas calentadas.</p> <p>No es aplicable</p>	<p>No es aplicable</p>	<p>Se requiere Louvre especiales. Apropiados para chapas de madera. El roto - Louvre no es apropiado</p> <p>No es aplicable</p>
<p>De transportador neumático. Tipo directo, de operación continua</p>	Véanse los comentarios bajo lechadas.	Solo se puede usar si el producto se recircula, para hacer manejable la alimentación	<p>En general requiere la recirculación del producto seco para obtener una alimentación adecuada. Muy apropiado para grandes capacidades. Casi siempre, se necesita desintegración.</p>	<p>Apropiado para materiales que se suspenden fácilmente en una corriente de gas y pierden humedad sin mayores problemas. Muy apropiado para grandes capacidades.</p>	<p>Apropiado para materiales que se suspenden fácilmente en una corriente de gas. Muy apropiado para grandes capacidades. Pueda ser que el producto sufra cierta degradación física</p>	No es aplicable	No es aplicable	No es aplicable

Tipo de secador	Líquidos	Lechadas	Pastas y lodos	Polvos de movimiento libre	Sólidos granulares Cristalinos o fibrosos	Sólidos grandes, formas y contornos especiales	Láminas continuas	Láminas discontinuas
		Soluciones verdaderas y coloidales: emulsiones. Ejemplos. Soluciones de sales inorgánicas extractos, leches, sangre, licores de desecho, lactes de caucho, etc.	Suspensiones bombeables: ejemplos. Lechadas de pigmentos, jabón y detergentes, carbonato de calcio, bentonita, suspensión fluida de arcilla, concentración de plomo, etc	Ejemplo: Tortas de prensa de filtrar, lodos de sedimentación, sólidos centrifugados, almidón, etc.	Malla de tamiz 100 o menores. De movimiento relativamente libre en estado húmedo. Polvoriento cuando están secos, ejemplo: precipitados, centrifugados, cementos, arcillas, pigmentos.	Mayores que malla 100. Ejemplo: Fibra de rayón, cristales de sales, arena, minerales, tiras de papa, hules sintéticos.	Ejemplo: Alfarería, ladrillos, tortas de rayón, casquillos de escopeta, sombreros, objeto pintados, madejas de rayón, maderas.	Papel, telas impregnadas, paños, celofán, láminas de plástico
De rocío. Tipo directo operación continuo	Apropiados para grandes capacidades. Por lo común el producto es polvoriento, esférico y de libre movimiento. Es factible usar temperaturas elevadas con materiales sensibles al calor. El producto puede tener una densidad a granel reducida.	Véanse las observaciones bajo líquidos. Atomizadores de boquillas a presión sujetos a erosión.	Requiere equipos especiales de bombeo, para alimentar el atomizador. Véanse las observaciones bajo líquidos.	No es aplicable.	No es aplicable.	No es aplicable.	No es aplicable.	No es aplicable.
En láminas o capas continuas de material. Operación por lotes continuos.	No es aplicable	No es aplicable	No es aplicable.	No es aplicable	No es aplicable.	No es aplicable.	Existen diferentes tipos para distintos requisitos. Apropiado para la desecación sin contacto con superficies calientes.	No es aplicable.
De parrillas al vacío. Tipo indirecto operación por lotes	No es aplicable	Aplicable para producciones pequeñas por lotes.	Apropiado para operaciones de lotes a pequeñas cantidades. Útil para materiales sensibles al calor o fácilmente oxidables. Los disolventes se pueden recuperar.	Véanse las observaciones bajo pastas y lodos.	Apropiados para operaciones por lotes a capacidades reducidas. Útiles para materiales sensibles al calor o fácilmente oxidables. Los disolventes se pueden recuperar.	Véanse las observaciones bajo sólidos granulados.	No es aplicable	Véanse las observaciones bajo sólidos granulados.
Por congelación al vacío. Tipo indirecto, operación por lotes o continuo	Por lo común, solo se usa para productos farmacéuticos, como penicilina y plasma sanguíneo. Es costoso. Se emplea con materiales sensible al calor o fácilmente oxidables.	Véanse las observaciones bajo líquidos.	Véanse las observaciones bajo líquidos.	Véanse las observaciones bajo líquidos.	Es costoso. Casi siempre se utiliza con productos farmacéuticos y relacionados. Dificiles de desecar por otros medios. Es aplicable a compuestos químicos finos.	Véanse las observaciones bajo sólidos granulados.	Se aplica en casos especiales, como en películas recubiertas de emulsión.	Véanse las observaciones bajo sólidos granulados.
De artesa. Tipo indirecto operación por lotes.	Atmosférico al vacío. Adecuado para lotes pequeños. Se limpia con facilidad. Los disolventes son recuperables. El material se agita durante el secado.	Véanse las observaciones bajo líquidos.	Véanse las observaciones bajo líquidos.	Véanse las observaciones bajo líquidos.	Apropiado para lotes pequeños, se limpia con facilidad. El material se agita durante la desecación, generando cierta degradación.	No es aplicable.	No es aplicable	No es aplicable
Rotatorio al vacío. Tipo indirecto, operación por lotes.	No es aplicable excepto cuando se bombea lentamente sobre una base seca.	Puede tener aplicaciones en casos especiales, cuando se bombea sobre una base seca.	Su empleo es cuestionable. Por lo común, el material se aglutina en tortas sobre las paredes del secador y el agitador. Los disolventes son recuperables.	Apropiado para materiales no adhesivos. Útil para lotes grandes de materiales sensibles al calor y para la recuperación de disolventes	Útil para lotes grandes de materiales sensibles al calor o cuando se deben recuperar los disolventes. El producto se somete a cierto grado de tritución. Es probable que se necesiten recolectores de polvo.	No es aplicable.	No es aplicable	No es aplicable

Tipo de secador	Líquidos	Lechadas	Pastas y lodos	Polvos de movimiento libre	Sólidos granulares Cristalinos o fibrosos	Sólidos grandes, formas y contornos especiales	Láminas continuas	Láminas discontinuas
		Soluciones verdaderas y coloidales: emulsiones. Ejemplos. Soluciones de sales inorgánicas extractos, leches, sangre, licores de desecho, lactes de caucho, etc.	Suspensiones bombeables: ejemplos. Lechadas de pigmentos, jabón y detergentes, carbonato de calcio, bentonita, suspensión fluida de arcilla, concentración de plomo, etc	Ejemplo: Tortas de prensa de filtrar, lodos de sedimentación, sólidos centrifugados, almidón, etc.	Malla de tamiz 100 o menores. De movimiento relativamente libre en estado húmedo. Polvoriento cuando están secos, ejemplo: precipitados, centrifugados, cementos, arcillas, pigmentos.	Mayores que malla 100. Ejemplo: Fibra de rayón, cristales de sales, arena, minerales, tiras de papa, hules sintéticos.	Ejemplo: Alfarería, ladrillos, tortas de rayón, casquillos de escopeta, sombreros, objeto pintados, madejas de rayón, maderas.	Papel, telas impregnadas, paños, celofán, láminas de plástico
Rotatorio indirecto y transportador de tornillo. Tipo indirecto de operación continua.	Aplicable con recirculación del producto seco.	Aplicable con recirculación del producto seco.	Requiere casi siempre recirculación del producto seco. Se genera poco polvo.	Su principal ventaja es la baja pérdida del polvos. Es muy apropiado para la mayor parte de los materiales y capacidades, sobre todo cuando se requiere una desecación a la temperatura del vapor.	Pocas pérdidas del polvo. El material no debe adherirse ni ser sensible a la temperatura.	No es aplicable.	No es aplicable.	No es aplicable.
Lechos fluidos. Por lotes continuos. Directos e indirectos.	Es aplicable solo con un lecho inerte o un recirculador de sólidos secos.	Véanse las observaciones bajo líquidos.	Véanse las observaciones bajo líquidos.	Es apropiado si no hay demasiado polvo.	Es adecuado para cristales, gránulos y fibras cortas.	No es aplicable.	Utiliza partículas inertes calientes para el contacto.	Utiliza partículas inertes para el contacto.
De bandejas vibradoras. Tipo indirecto, operación continua.	No es aplicable	No es aplicable.	No es aplicable.	Apropiado para materiales de movimiento libre.	No es aplicable.	No es aplicable.	No es aplicable	No es aplicable.
De tambor. Tipo indirecto de operación continua.	De uno, dos o tambores gemelos. Operación atmosférica o al vacío. El producto es en forma de escamas y generalmente polvoriento. Los costos de mantenimiento pueden ser elevados.	Véanse las observaciones bajo líquidos. Los secadores de tambores gemelos se emplean profusamente.	Se utiliza solo cuando la pasta o los lodos pueden fluir. Ver observaciones bajo líquidos.	No es aplicable.	No es aplicable.	No es aplicable.	No es aplicable.	No es aplicable.
De cilindro. Tipo indirecto de operación continua.	No es aplicable.	No es aplicable.	No es aplicable.	No es aplicable.	No es aplicable.	No es aplicable.	Apropiado para láminas delgadas o mecánicamente débiles que se pueden secar en contacto con una superficie calentada. Se pueden obtener efectos superficiales especiales.	Adecuado para materiales que no requieren una desecación plana y que no se dañaran al entrar en contacto con el tambor caliente.
Infrarrojo. Operación por lotes o continuas.	Solo para películas delgadas.	Véanse las observaciones bajo líquidos.	Véanse las observaciones bajo líquidos. (Solo para capas delgadas)	Solo para capas delgadas.	Apropiado sobre todo para desecar la humedad superficial. No es adecuado para capas gruesas.	Apropiado sobre todo para desecar y hornear pinturas y esmaltes.	Se emplea comúnmente en combinación con otros métodos. Es útil cuando se tiene limitaciones de espacio.	Útil para trabajos de laboratorio o en combinación con otros métodos.

ANEXO B. Propiedades termodinámicas del aire, agua y vapor de agua

Tempe- ratura F	Propiedades del agua y vapor de agua				Propiedades del aire seco a la presión abs. De 29.921 pulg. Hg.		Propiedades de la mezcla de aire seco y vapor de agua saturado a la presión total de 29.921 pulg. Hg. abs.		
	Presión de saturación de agua y vapor de agua en pulgadas Hg.	Entalpía		Volumen específico del vapor de agua saturado	Volumen específico verdadero	Entalpía	Volumen de la mezcla por lb. de aire seco	Entalpía de la mezcla por lb. de aire seco	Humedad específica, granos por lb. de aire seco
		Agua de saturación	Vapor saturado						
32	0.1803	0.0	1075.2	33305	12.389	7.69	12.46	11.75	26.40
33	0.1878	1.0	1075.6	3180	12.414	7.93	12.49	12.16	27.49
34	0.1955	2.0	1076.0	3062	12.439	8.17	12.52	12.57	28.63
35	0.2034	3.0	1076.5	2948	12.464	8.41	12.55	13.00	29.80
36	0.2117	4.0	1076.9	2839	12.490	8.65	12.58	13.42	31.02
37	0.2202	5.0	1077.4	2734	12.515	8.89	12.61	13.86	32.28
38	0.2290	6.0	1077.8	2634	12.540	9.13	12.64	14.30	33.58
39	0.2382	7.0	1078.2	2538	12.565	9.37	12.67	14.75	34.94
40	0.2477	8.0	1078.7	2445	12.591	9.61	12.70	15.21	36.34
41	0.2575	9.0	1079.1	2357	12.616	9.85	12.73	15.68	37.80
42	0.2676	10.1	1079.5	2272	12.641	10.09	12.76	16.36	39.30
43	0.2781	11.1	1080.0	2190	12.667	10.34	12.79	16.64	40.86
44	0.2890	12.1	1080.4	2112	12.692	10.58	12.82	17.13	42.47
45	0.3002	13.1	1080.9	2037	12.717	10.82	12.85	17.63	44.14
46	0.3119	14.1	1081.3	1965	12.742	11.06	12.88	18.13	45.86

47	0.3239	15.1	1081.7	1896	22.768	11.30	12.91	18.66	47.65
48	0.3363	16.1	1082.2	1829	12.793	11.54	12.94	19.19	49.51
49	0.3491	17.1	1082.6	1766	12.818	11.75	12.97	19.73	51.42
50	0.3624	18.1	1083.1	1704	12.844	12.02	13.00	20.28	53.40
51	.03761	19.1	1083.5	1645	12.869	12.26	13.03	20.84	55.44
52	0.3903	20.1	1083.9	1589	12.894	12.50	13.06	21.41	57.56
53	0.4049	21.1	1084.4	1534	12.919	12.74	13.10	21.99	59.75
54	0.4200	22.1	1084.8	1482	12.945	12.98	13.13	22.59	62.01
55	0.4356	23.1	1085.2	1431	12.970	13.22	13.16	23.20	64.36
56	0.4508	24.1	1085.7	1383	12.995	13.46	13.19	23.82	66.78
57	0.4684	25.1	1086.1	1336	13.020	13.70	13.23	24.45	69.28
58	0.4856	26.1	1086.5	1292	13046	13.94	13.26	25.10	71.86
59	0.5033	27.1	1087.0	1249	13.071	14.18	13.29	25.76	74.54
60	0.5216	28.1	1087.4	1207	13.096	14.42	13.33	26.43	77.29
61	0.5405	29.1	1087.9	1167	13.122	14.66	13.36	27.11	80.14
62	0.559	30.1	1088.3	1129	13.147	14.90	13.40	27.82	83.09
63	05800	31.1	1088.7	1092	13.172	15.14	13.43	28.54	86.14
64	0.6007	32.1	1089.2	1056	13.197	15.38	13.47	29.27	89.27
65	0.6221	33.1	1089.6	1022	13.223	15.62	13.50	30.03	92.51
66	0.6441	34.1	1090.0	988.6	13.248	15.86	13.54	30.79	95.86
67	0.6658	35.1	1090.5	956.8	13.273	16.10	13.58	31.58	99.32
68	0.6902	36.1	1090.9	926.1	13.298	16.35	13.61	32.38	102.9
69	0.7143	37.1	1091.3	896.5	13.324	16.59	13.65	33.20	106.6

70	0.7392	38.1	1091.8	868.0	13.349	16.83	13.69	34.04	110.4
71	0.7648	39.1	1092.2	840.5	13.374	17.07	13.72	34.90	114.3
72	0.7911	40.1	1092.6	814.0	13.399	17.31	13.76	35.79	118.4
73	0.8183	41.1	1093.1	788.4	13.425	17.55	13.80	36.69	122.6
74	0.8463	42.1	1093.5	763.8	13.450	17.79	13.84	37.61	126.9
75	0.8751	43.1	1093.9	740.0	13.475	18.03	13.88	38.55	131.3
76	0.947	44.1	1094.4	717.0	13.501	18.27	13.92	39.52	135.9
77	0.9352	45.1	1094.8	694.9	13.526	18.51	13.96	40.51	140.6
78	0.9667	46.1	1095.2	673.5	13.551	18.75	14.00	41.52	145.5
79	0.9990	47.1	1095.7	652.9	13.576	18.99	14.04	42.56	150.6
80	1.323	48.1	1096.1	633.0	13.602	19.23	14.09	43.63	155.8
81	1.665	49.1	1096.6	613.8	13.627	19.47	14.13	44.72	161.2
82	1.1017	50.1	1097.0	595.3	13652	19.71	14.17	45.84	166.7
83	1.1380	51.1	1097.4	577.4	13.678	19.95	14.22	46.98	172.4
84	1.1752	52.1	1097.8	560.1	13.703	20.19	14.26	48.16	178.3
85	1.2136	53.1	1098.3	543.3	13.738	20.43	14.31	49.36	184.4
86	1.2530	54.0	1098.7	527.2	13.753	20.67	14.35	50.59	190.6
87	1.2935	55.0	1099.1	511.6	13.778	20.91	14.40	51.86	197.0
88	1.3351	56.0	1099.6	496.5	13.804	21.15	14.45	53.14	203.7
89	1.3779	57.0	1100.0	482.0	13.829	21.39	14.50	54.48	210.6
90	1.4219	58.0	1100.4	467.9	13.854	21.64	14.55	55.85	217.6
91	1.4671	59.0	1100.9	454.3	13.880	21.88	14.60	57.25	224.9
92	1.5136	60.0	1101.3	441.1	13.905	22.12	14.65	58.69	232.4

93	1.5613	61.0	1101.7	428.4	13.930	22.36	14.70	60.16	240.1
94	1.603	62.0	1102.2	416.1	13.955	22.60	14.75	61.67	248.1
95	1.6607	63.0	1102.6	404.2	13.981	22.84	14.80	63.22	256.4
96	1.7124	64.0	1103.0	392.7	14.006	23.08	14.86	64.81	264.8
97	1.7655	65.0	1103.4	381.5	14.031	23.32	14.91	66.45	273.6
98	1.8200	66.0	1103.9	370.7	14.057	23.56	14.97	68.13	282.6
99	1.8759	67.0	1104.3	360.3	14.082	23.80	15.02	69.86	291.9
100	1.9334	68.0	1104.7	350.2	14.107	24.04	15.08	71.62	301.5
101	1.9923	69.0	1105.2	340.4	14.132	24.28	15.14	73.44	311.3
102	2.0529	70.0	1105.6	331.0	14.157	24.52	15.20	75.31	321.5
103	2.1149	71.0	1106.0	321.8	14.183	24.76	15.26	77.22	332.0
104	2.1786	72.0	1106.4	313.0	14.208	25.00	15.32	79.19	342.8
105	2.2440	73.0	1106.9	304.4	14.233	25.24	15.39	81.21	353.9
106	2.3110	74.0	1107.3	296.0	14.259	25.48	15.45	83.29	365.4
107	2.3798	75.0	1107.7	288.0	14.284	25.72	15.52	85.42	377.2
108	2.4503	76.0	1108.2	280.2	14.309	25.96	15.59	87.62	389.4
109	2.5226	77.0	1108.6	272.6	14.334	26.20	15.65	89.87	402.0
110	2.5968	78.0	1109.0	265.3	14.360	26.45	15.72	92.19	414.9
111	2.6728	79.0	1109.4	258.2	14.385	26.69	15.80	94.58	428.3
112	2.7507	80.0	1109.9	251.3	14.410	26.93	15.87	97.03	442.1
113	2.8306	81.0	1110.3	244.6	14.435	27.17	15.94	99.55	456.3
114	2.9125	82.0	1110.7	238.1	14.461	27.41	16.02	102.16	471.0
115	2.9963	83.0	1111.1	231.8	14.486	27.65	16.10	104.81	486.1

116	3.0823	84.0	1111.6	225.8	14.511	27.89	16.18	107.55	501.6
117	3.1703	85.0	1112.0	219.9	14.537	28.13	16.26	110.38	517.7
118	3.2606	86.0	1112.4	214.1	14.562	28.37	16.34	113.29	534.3
119	3.3530	87.0	1112.8	208.6	14.587	28.61	16.43	116.28	551.4
120	3.4477	88.0	1113.3	203.2	14.612	28.85	16.51	119.36	569.0
121	3.5446	89.0	1113.7	197.9	14.637	29.09	16.60	122.52	587.2
122	3.6439	90.0	1114.1	192.9	14.663	29.33	16.70	125.79	606.0
123	3.7455	91.0	1114.5	188.0	14.688	29.57	16.79	129.15	625.3
124	3.8496	92.0	1114.9	183.2	14.713	29.82	16.89	132.61	645.3
125	3.3961	93.0	1115.4	178.5	14.739	30.06	16.98	136.17	665.9
126	4.0651	94.0	1115.8	174.0	14.764	30.30	17.08	139.88	687.2
127	4.1768	95.0	1116.2	169.6	14.789	30.54	17.19	143.64	709.2
128	4.2910	96.0	1116.6	165.4	14.814	30.78	17.29	147.54	731.9
129	4.4078	97.0	1117.0	161.3	14.839	31.02	17.40	151.57	755.4
130	4.5274	98.0	1117.5	157.3	14.865	31.26	17.52	155.72	779.6
131	4.6498	99.0	1117.9	153.4	14.890	31.50	17.63	160.00	804.6
132	4.7750	100.0	1118.3	149.6	14.915	31.74	17.75	164.43	830.5
133	4.9030	101.0	1118.7	145.9	14.941	31.98	17.87	168.98	857.2
134	5.0340	102.0	1119.2	142.4	14.966	32.22	17.99	173.69	884.8
135	5.1679	103.0	1119.6	138.9	14.991	32.46	18.12	178.54	913.3
136	5.3049	104.0	1120.0	135.5	15.016	32.70	18.25	183.57	942.8
137	5.4450	105.0	1120.4	132.2	15.043	32.94	18.39	188.75	973.4
138	5.5881	106.0	1120.8	129.1	15.067	33.18	18.53	194.09	1000.0

139	5.7345	107.0	1121.2	126.0	15.092	33.43	18.67	199.64	1038
140	5.8842	108.0	1121.7	123.0	15.117	33.67	18.82	205.34	10071
141	6.0371	109.0	1122.1	120.0	15.143	33.91	18.97	211.27	1106
142	6.1934	110.0	1122.5	117.2	15.168	34.15	19.13	217.39	1143
143	6.3532	111.0	1122.9	114.4	15.193	34.39	19.29	223.70	1180
144	6.164	112.0	1123.3	111.7	15.218	34.63	19.45	230.28	1219
145	6.6832	113.0	1123.7	109.1	15.244	34.87	19.62	236.94	1259
146	6.8536	114.0	1124.1	106.6	15.269	35.11	19.81	244.06	1301
147	7.0277	115.0	1124.6	104.1	15.294	35.35	19.99	251.34	1344
148	7.2056	116.0	1125.6	101.7	15.319	35.59	20.18	258.88	1389
149	7.3872	117.0	1125.4	99.32	15.345	35.83	20.37	266.71	1436
150	7.5727	118.0	1125.8	97.04	15.370	36.07	20.58	274.84	1485
151	7.7622	119.0	11.26.2	94.81	15.395	36.31	20.79	283.25	1535
152	7.9556	120.0	1126.6	92.65	15.420	36.56	21.01	292.00	1587
153	8.1532	121.0	1127.0	90.54	15.446	36.80	21.23	301.07	1641
154	8.3548	122.0	1127.4	88.49	15.471	37.04	21.46	310.53	1698
155	8.5607	123.0	1127.8	86.50	15.496	37.28	21.71	320.34	1757
156	8.7708	124.0	1128.3	84.55	15.521	37.52	21.96	330.57	1818
157	8.9853	125.0	1128.7	82.66	15.547	37.76	22.22	341.18	1882
158	9.2042	126.0	1129.1	80.81	15.572	38.00	22.49	352.24	1948
159	9.4276	127.0	1129.5	79.02	15.597	38.24	22.77	363.29	2018
160	9.6556	128.0	1129.9	77.27	15.622	38.48	23.07	375.81	2090
161	9.8882	129.0	1130.3	75.56	15.648	38.72	23.37	388.34	2165

162	10.126	130.0	1130.7	7.90	15.673	38.96	23.69	401.45	2244
163	10.368	131.0	1131.1	72.28	15.698	39.21	24.02	315.14	2326
164	10.615	132.0	1131.5	70.71	15.724	39.45	24.37	429.44	2412
165	10.867	133.0	1131.9	69.17	15.749	39.69	24.73	444.41	2503
166	11.124	134.0	1132.3	67.67	15.774	39.96	25.11	460.10	2597
167	11.386	135.0	1132.7	66.21	15.799	40.17	25.50	476.53	2696
168	11.653	136.0	1133.1	64.79	15.824	40.41	25.92	493.77	2880
169	11.925	137.0	1133.5	63.40	15.850	40.65	26.35	511.83	2910
170	12.203	138.0	1133.9	62.04	15.875	40.89	26.81	530.86	3024
171	12.487	139.0	1134.4	60.73	15.900	41.13	27.29	550.89	3145
172	12.775	140.0	1134.8	59.44	15.925	41.37	27.79	571.97	3273
173	13.080	141.0	1135.2	58.18	15.951	41.61	28.32	594.19	3407
174	13.370	142.0	1135.6	56.96	15.976	41.85	28.88	617.65	3549
175	13.676	143.0	1136.0	55.77	16.001	42.10	29.47	642.48	3699
176	13.987	144.0	1136.4	54.60	16.026	42.34	30.09	668.67	3858
177	14.305	145.0	1136.8	53.47	16.052	42.58	30.75	696.49	4026
178	14.629	146.0	1137.2	52.36	16.077	42.82	31.46	726.004	4205
179	14.959	147.0	1137.6	51.28	16.103	43.06	32.21	757.46	4396
180	15.295	148.0	1137.9	50.22	16.128	43.30	32.99	790.88	4598
181	15.637	149.0	1138.3	49.19	16.153	43.54	33.83	826.46	4815
182	15.986	150.0	1138.7	48.19	16.178	43.78	34.74	864.74	5046
183	16.341	151.0	1139.1	47.20	16.203	44.02	35.70	905.58	5294
184	16.703	152.0	1139.5	46.25	16.229	44.26	36.74	949.49	5560

185	17071	153.0	1139.9	45.31	16.254	44.51	37.85	996.86	5847
186	17.446	154.0	1140.3	44.40	16.279	44.75	39.04	1047.7	6156
187	17.829	155.0	1140.7	43.51	16.304	44.99	40.34	1102.8	6491
188	18.218	156.0	1141.1	42.64	16.329	45.23	41.75	1162.6	6854
189	18.614	157.0	1141.5	41.79	16.354	45.47	43.28	1227.8	7250
190	19.017	158.0	1141.9	40.96	16.380	45.71	44.94	1298.9	7682
191	19.428	159.1	1142.3	40.14	16.405	45.95	46.78	1376.9	8156
192	19.846	160.1	1142.7	39.35	16.430	46.19	48.79	1463.0	8679
193	20.271	161.1	1143.1	38.58	16.456	46.43	51.02	1558.2	9257
194	20.704	162.1	1143.5	37.82	16.481	46.68	53.50	1664.0	9901
195	21.145	163.1	1143.8	37.09	16.506	46.92	56.27	1782.6	10622
196	21.594	164.1	1144.2	36.36	16.531	47.16	59.40	1916.2	11434
197	22.050	165.1	1144.6	35.66	16.556	47.40	62.93	2067.6	12354
198	22.515	166.1	1145.0	34.97	16.582	47.64	66.99	2240.9	13409
199	22.987	167.1	1145.4	34.30	16.607	47.88	71.66	2240.9	14624
200	23.468	168.1	1145.8	33.64	16.632	48.12	77.14	2675.6	16052

ANEXO C. Condiciones climatológicas del municipio de Sahagun
departamento de Córdoba

Cuadro 1.

IDEAM – INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES															
SISTEMA DE INFORMACIÓN NACIONAL AMBIENTAL															
VALORES MEDIOS MENSUALES DE TEMPERATURA															
FECHA DE PROCESO : 2001/08/21										ESTACIÓN : 2502517 COLOMBOY					
LATITUD 0845 N				TIPO EST CO				DPTO CORDOBA				FECHA INST. 1973			
LONGITUD 7530 W				ENTIDAD 01 IDEAM				MUNICIPIO SAHAGUN				FECHA SUSPEN.			
ELEVACIÓN 0125m.s.n.m				Regional Atlántico				CORR. MONTEGRANDE							
Año	Es	En	ener	febre	marz	abril	may	junio	julio	agost	Sept	octub	nov	Dic	Vr
	t	t	o	ro	o		o			o		re			anual
81			26.2	26.9	27.0	27.1	26.5	26.2	26.6	26.6	26.4	26.6	26.5	26.9	26.6
82			26.6	26.7	27.1	26.9	26.4	26.7	26.8	27.1	26.5	26.1			26.7
83			27.1	27.3	27.5	27.1	27.3	27.4	27.8	28.0	26.6	26.7	27.4	26.7	27.2
84			27.0	27	27.5	27.5	26.9	26.4	26.2	26.5	26.0	26.1			26.7
85				27.2	27.6	27.3	27.2	27.3	26.4	26.6	26.6	26.6	26.5	26.5	26.9
86			27.2	27.1	27.8	27.0	27.2	27.2	27.3	27.7	27.0	26.5	26.9	27.4	27.2
87			27.7	28.5	28.2	27.9	27.2	27.5	27.3	27.3	27.1	27.1	27.7	27.5	27.6
88			27.9	28.2	28.5	27.8	27.4	27.0	26.9	26.4	26.9	27.0	27	27.3	27.4
89			27.2	27.2	26.9	27.6	26.7	27.0	27.2	26.8	26.5	26.4	27	26.8	26.9
90			27.3	27.2	27.3	27.6	26.9	27.4	27.3	27.1	26.7	26.6	27.1		27.1
92			27.6	27.9	28.2	28.4	27.1				26.8	26.8		27.1	27.5
93			27.5	27.7	27.9	27.6	27.1	27.7	27.1	27.1	26.7	27.1	26.9	27.3	27.3
94			27.5	27.9	27.7	27.5	27.1	27.5	27.6	27.2	27.1	26.6	26.7	27.4	27.3

95			27.8	27.7	28.2	28.1	27.4	27.2	27.2	27.1	27.1	27.0	27.4	27.3	27.5
96			27.6	27.8	27.6	27.8	27.1	27.1	27.3	27.2	27.2	27.1	27	27.2	27.3
97			27.5	27.6	28.2	27.9	28.2	27.4		28.3		27.6	27.4	28.3	27.8
98			28.9	28.8	29.1	28.8	27.8	28.7	27.4	27.4	27.3	27.4	27.3	26.7	27.9
99			27.2	26.8	27.2	27.1	27.1	27.1	27.2	27.2	26.5	26.7	27.1	27	27
00			27.1	27.2	27.3	27.6	27.3	27.3	27.4	27.8		27.0	27.2	27.3	27.3
01			27.5												27.5
Medios			27.4	27.5	27.7	27.6	27.2	27.2	27.1	27.2	26.8	26.8	27.1	27.2	27.2
Máximos			28.9	28.8	29.1	28.8	28.2	27.8	27.8	28.3	27.3	27.6	27.7	28.3	29.1
Mínimos			26.2	26.7	26.9	26.9	26.4	26.2	26.2	26.4	26.0	26.1	26.5	26.5	26

Cuadro 2.

IDEAM – INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES															
SISTEMA DE INFORMACIÓN NACIONAL AMBIENTAL															
VALORES MEDIOS MENSUALES DE TERMÓMETRO HÚMEDO (°C)															
FECHA DE PROCESO : 2001/08/21								ESTACIÓN : 2502517 COLOMBOY							
LATITUD 0845 N				TIPO EST CO				DPTO CORDOBA				FECHA INST. 1973			
LONGITUD 7530 W				ENTIDAD 01 IDEAM				MUNICIPIO SAHAGUN				FECHA SUSPEN.			
ELEVACIÓN 0125m.s.n.m				Regional Atlántico				CORR. MONTEGRANDE							
Año	Es	En	Ener	febre	marz	abril	may	junio	julio	Agos	Sept	octub	nov	Dic	Vr
	t	t	o	ro	o		o			to		re			anual
81															
82															
83															
84															
85															
86															
87			24.5	25.1	25.0	25	24.9	24.9	24.7	24.9	24.8	24.8	25.2	25.1	24.9
88			24.9	25.1	24.9	24.9	25	24.7	24.5	24.4	24.5	24.7	24.8	24.8	24.8
89			24	23.8	24.6	24.6	24.6	25	24.8	24.5	24.4	24.4	24.8	24.7	24.5
90			24.9	24.6	25	25	25	25.3	25	25	24.8	24.6	25		24.9
92			24.5	24.6	25.2	25.2	24.9				24.7	24.8		24.8	24.8
93			24.6	24.4	25.2	25.2	25.1	25.3	25	24.9	24.6	25.1	24.8	25	24.9
94			24.5	25.2	25.4	25.4	25.4	25.4	25.3	25	25.1	24.7	24.8	25.1	25.1
95			24.7	24.5	24.9	25.5	25.3	25.1	25.1	25.3	25	25	25.1	24.8	25
96			24.6	24.8	24.8	25.2	25.1	25.1	25.1	25.1	24.8	25	24.9	24.9	24.9
97			24.8	24.9	24.7	25	25.4	25.2		25.1		25.4	25.3	25.5	25.2
98			25.3	25.2	25.3	25.6	25.5	25.6	25.3	25.3	25.1	25.3	25	24.6	25.3

99			24	24	24.3	24.8	25	24.9	24.7	24.7	24.3	24.6	24.7	24.5	24.5
00			23.8	24	24.1	24.8	25	25	24.7	24.9		25	24.8	24.5	24.6
01			24												24
Medios			24.5	24.6	24.7	25.1	25.1	25.1	24.9	24.9	24.7	24.9	24.9	24.9	24.9
Máximos			25.3	25.2	25.3	25.6	25.5	25.6	25.3	25.6	25.1	25.4	25.3	25.5	25.6
Mínimos			23	23.8	24.1	24.6	24.6	24.7	24.5	24.4	24.3	24.4	24.7	24.5	23.8

Cuadro 3.

IDEAM – INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES															
SISTEMA DE INFORMACIÓN NACIONAL AMBIENTAL															
VALORES MEDIOS MENSUALES DE HUMEDAD RELATIVA															
FECHA DE PROCESO : 2001/08/21									ESTACIÓN : 2502517 COLOMBOY						
LATITUD 0845 N			TIPO EST CO			DPTO CORDOBA			FECHA INST. 1973						
LONGITUD 7530 W			ENTIDAD 01 IDEAM			MUNICIPIO SAHAGUN			FECHA SUSPEN.						
ELEVACIÓN 0125m.s.n.m			Regional Atlántico			CORR. MONTEGRANDE									
Año	Es	En	ener	febre	marz	abril	may	junio	julio	agost	Sept	Octu	nov	Dic	Vr
	t	t	o	ro	o		o			o		bre			anual
81			83	80	82	81	87	88	85	84	84	84	84	84	84
82			81	81	76	81	84	84	84	84	85	84			82
83			81	78	80	83	85	86	84			86		84	83
84			80	78	79	79	82	85	85	84	84	84			82
85			79	75	72	75	79	79	81	81	81	83	84	83	79
86			78	79	75	82	82	82	81	80	82	84	83	81	81
87			80	77	78	79	83	82	82	83	83	83	82	83	81
88			78	78	76	80	82	83	82	84	82	83	83	82	81
89			83	77	80	79	84	85	83	84	84	85	84	85	82
90			79	81	81	81	86	85	84	85	87	86	85		84
92			80	78	77	78	84				85	85		84	81
93			79	78	77	82	86	83	85	85	85	86	85	84	83
94			79	82	82	84	87	85	83	85	86	86	86	84	84
95			80	79	78	81	85	85	86	85	85	86	84	83	83
96			82	80	81	82	86	86	85	83	84	84	85	84	84
97			76	82	78	80	81	85		81		86	85	81	82

98			78	76	75	78	85	84	85	85	85	85	84	85	82
99			78	80	79	83	85	85	83	83	85	85	84	83	83
00			77	78	78	80	84	84	82	81			84	81	81
01															77
Medios			80	79	78	80	84	84	84	83	84		84	83	82
Máximos			83	82	82	84	87	88	86	85	87		86	85	88
Mínimos			76	75	72	75	79	79	81	80	81		82	81	72

Anexo D. Carta Psicométrica

Anexo E. Valores de la entalpía de formación, de la función de Gibbs de formación, de la entropía absoluta y la entalpía de vaporización a 25°C y 1atm Δh_f^0 , Δg_f^0 y h_{fg} en KJ/kgmol; s^0 en KJ/(kgmol.K)

Sustancia	Fórmula	Δh_f^0	Δg_f^0	s^0	h_{fg}
Carbono	C(s)	0	0	5.74	
Hidrógeno	H ₂ (g)	0	0	130.57	
Nitrógeno	N ₂ (g)	0	0	191.50	
Oxígeno	O ₂ (g)	0	0	205.04	
Monóxido de carbono	CO(g)	-110,530	-137,150	197.56	
Dióxido de carbono	CO ₂ (g)	-393,520	-394,380	213.67	
Agua	H ₂ O(g)	-241,820	-228,590	188.72	
Agua	H ₂ O(l)	-285,830	-237,180	69.95	44,010
Peróxido de hidrógeno	H ₂ O ₂ (g)	-136,310	-105,600	232.63	61,090
Amoniaco	NH ₃ (g)	-46,190	-16,590	192.33	
Oxígeno	O(g)	249,170	231,770	160.95	
Hidrógeno	H(g)	218,000	203,290	114.61	
Nitrógeno	N(g)	472,680	455,510	153.19	
Hidroxilo	OH(g)	39,040	34,280	183.75	
Metano	CH ₄ (g)	-74,850	-50,790	186.16	
Acetileno (etino)	C ₂ H ₂ (g)	226,730	209,170	200.85	
Etileno (eteno)	C ₂ H ₄ (g)	52,280	68,120	219.83	
Etano	C ₂ H ₆ (g)	-84,680	-32,890	229.49	
Propileno (propeno)	C ₃ H ₆ (g)	20,410	62,720	266.94	
Propano	C ₃ H ₈ (g)	-103,850	-23,490	269.91	15,060
n-butano	C ₄ H ₁₀ (g)	-126,150	-15,710	310.03	21,060
n-pentano	C ₅ H ₁₂ (g)	-146,440	-8,200	348.40	31,410
n-octano	C ₈ H ₁₈ (g)	-208,450	17,320	463.67	41,460
n-octano	C ₈ H ₁₈ (l)	-249,910	6,610	360.79	
Benceno	C ₆ H ₆ (g)	82,930	129,660	269.20	33,830
Alcohol metílico	CH ₃ OH(g)	-200,890	-162,140	239.70	37,900
Alcohol metílico	CH ₃ OH(l)	-238,810	-166,290	126.80	
Alcohol etílico	C ₂ H ₅ OH(g)	-235,310	-168,570	282.59	42,340
Alcohol etílico	C ₂ H ₅ OH(l)	-277,690	-174,890	160.70	
Mercurio	Hg(l)	0	0	77.24	
Óxido de mercurio	HgO(c)	-90,210	-58,400	70.45	
Manganeso	Mn(c)	0	0	31.8	
Dióxido de manganeso	MnO ₂ (c)	-520,030	-465,180	53.14	
Trióxido de manganeso	Mn ₂ O ₃ (c)	-958,970	-881,150	110.5	
Plomo	Pb(c)	0	0	64.81	
Óxido de plomo	PbO ₂ (c)	-277,400	-217,360	68.6	
Sulfato de plomo	PbSO ₄ (c)	-919,940	-813,200	148.57	
Cinc	Zn(c)	0	0	41.63	
Óxido de cinc	ZnO(c)	-348,280	-318,320	43.64	
Ácido sulfúrico	H ₂ SO ₄ (l)	-813,990	-690,100	156.90	
Ácido sulfúrico	(ac, m = 1)	-909,270	-744,630	20.1	
Óxido de plata	Ag ₂ O(c)	-31,050	-11,200	121.7	

Fuentes: de las JANAF Thermochemical Tables, Dow Chemical CO., 1971; Selected Values of Chemical Thermodynamical Properties, NBS Technical Note 270-3, 1968, y API Research Project 44, Carnegie Press, 1953.

Anexo F. Entalpía, energía interna y entropía absoluta del nitrógeno diatómico (N₂) como gas ideal. $h_f = 0$ KJ/kgmol T, K; h y u , KJ/(kgmol.K)

T	h	u	s ^o	T	h	u	s ^o
0	0	0	0	600	17,563	12,574	212.066
220	6,391	4,562	182.639	610	17,864	12,792	212.564
230	6,683	4,770	183.938	620	18,166	13,011	213.055
240	6,975	4,979	185.180	630	18,468	13,230	213.541
250	7,266	5,188	186.370	640	18,772	13,450	214.018
260	7,558	5,396	187.514	650	19,075	13,671	214.489
270	7,849	5,604	188.614	660	19,380	13,892	214.954
280	8,141	5,813	189.673	670	19,685	14,114	215.413
290	8,432	6,021	190.695	680	19,991	14,337	215.866
298	8,669	6,190	191.502	690	20,297	14,560	216.314
300	8,723	6,229	191.682	700	20,604	14,784	216.756
310	9,014	6,437	192.638	710	20,912	15,008	217.192
320	9,306	6,645	193.562	720	21,220	15,234	217.624
330	9,597	6,853	194.459	730	21,529	15,460	218.059
340	9,888	7,061	195.328	740	21,839	15,686	218.472
350	10,180	7,270	196.173	750	22,149	15,913	218.889
360	10,471	7,478	196.995	760	22,460	16,141	219.301
370	10,763	7,687	197.794	770	22,772	16,370	219.709
380	11,055	7,895	198.572	780	23,085	16,599	220.113
390	11,347	8,104	199.331	790	23,398	16,830	220.512
400	11,640	8,314	200.071	800	23,714	17,061	220.907
410	11,932	8,523	200.794	810	24,027	17,292	221.298
420	12,225	8,733	201.499	820	24,342	17,524	221.684
430	12,518	8,943	202.189	830	24,658	17,757	222.067
440	12,811	9,153	202.863	840	24,974	17,990	222.447
450	13,105	9,363	203.523	850	25,292	18,224	222.822
460	13,399	9,574	204.170	860	25,610	18,459	223.194
470	13,693	9,786	204.803	870	25,928	18,695	223.562
480	13,988	9,997	205.424	880	26,248	18,931	223.927
490	14,285	10,210	206.033	890	26,568	19,168	224.288
500	14,581	10,423	206.630	900	26,890	19,407	224.647
510	14,876	10,635	207.216	910	27,210	19,644	225.002
520	15,172	10,848	207.792	920	27,532	19,883	225.353
530	15,469	11,062	208.358	930	27,854	20,122	225.701
540	15,766	11,277	208.914	940	28,178	20,362	226.047
550	16,064	11,492	209.461	950	28,501	20,603	226.389
560	16,363	11,707	209.999	960	28,826	20,844	226.728
570	16,662	11,923	210.528	970	29,151	21,086	227.064
580	16,962	12,139	211.049	980	29,476	21,328	227.398
590	17,262	12,356	211.562	990	29,803	21,571	227.728

T	h	u	s°	T	h	u	s°
1000	30,129	21,815	228.057	1760	56,227	41,594	247.396
1020	30,784	22,304	228.706	1780	56,938	42,139	247.798
1040	31,442	22,795	229.344	1800	57,651	42,685	248.195
1060	32,101	23,288	229.973	1820	58,363	43,231	248.589
1080	32,762	23,782	230.591	1840	59,075	43,777	248.979
1100	33,426	24,280	231.199	1860	59,790	44,324	249.365
1120	34,092	24,780	231.799	1880	60,504	44,873	249.748
1140	34,760	25,282	232.391	1900	61,220	45,423	250.128
1160	35,430	25,786	232.973	1920	61,936	45,973	250.502
1180	36,104	26,291	233.549	1940	62,654	46,524	250.874
1200	36,777	26,799	234.115	1960	63,381	47,075	251.242
1220	37,452	27,308	234.673	1980	64,090	47,627	251.607
1240	38,129	27,819	235.223	2000	64,810	48,181	251.969
1260	38,807	28,331	235.766	2050	66,612	49,567	252.858
1280	39,488	28,845	236.302	2100	68,417	50,957	253.726
1300	40,170	29,361	236.831	2150	70,226	52,351	254.578
1320	40,853	29,878	237.353	2200	72,040	53,749	255.412
1340	41,539	30,398	237.867	2250	73,856	55,149	256.227
1360	42,227	30,919	238.376	2300	75,676	56,553	257.027
1380	42,915	31,441	238.878	2350	77,496	57,958	257.810
1400	43,605	31,964	239.375	2400	79,320	59,366	258.580
1420	44,295	32,489	239.865	2450	81,149	60,779	259.332
1440	44,988	33,014	240.350	2500	82,981	62,195	260.073
1460	45,682	33,543	240.827	2550	84,814	63,613	260.799
1480	46,377	34,071	241.301	2600	86,650	65,033	261.512
1500	47,073	34,601	241.768	2650	88,488	66,455	262.213
1520	47,771	35,133	242.228	2700	90,328	67,880	262.902
1540	48,470	35,665	242.685	2750	92,171	69,306	263.577
1560	49,168	36,197	243.137	2800	94,014	70,734	264.241
1580	49,869	36,732	243.585	2850	95,859	72,163	264.895
1600	50,571	37,268	244.028	2900	97,705	73,593	265.538
1620	51,275	37,806	244.464	2950	99,556	75,028	266.170
1640	51,980	38,344	244.896	3000	101,407	76,464	266.793
1660	52,686	38,884	245.324	3050	103,260	77,902	267.404
1680	53,393	39,424	245.747	3100	105,115	79,341	268.007
1700	54,099	39,965	246.166	3150	106,972	80,782	268.601
1720	54,807	40,507	246.580	3200	108,830	82,224	269.186
1740	55,516	41,049	246.990	3250	110,690	83,668	269.763

Fuente: basado en los datos de las JANAF Thermochemical Tables, NSRDS-NBS-37, 1971.

Anexo G. Entalpía, energía interna y entropía absoluta del oxígeno diatómico (O₂) como gas ideal. $h_f = 0$ KJ/kgmol T, K; h y u , KJ/(kgmol.K)

T	h	u	s^0	T	h	u	s^0
0	0	0	0	600	17,929	12,940	226.346
220	6,404	4,575	196.171	610	18,250	13,178	226.877
230	6,694	4,782	197.461	620	18,572	13,417	227.400
240	6,984	4,989	198.696	630	18,895	13,657	227.918
250	7,275	5,197	199.885	640	19,219	13,898	228.429
260	7,566	5,405	201.027	650	19,544	14,140	228.932
270	7,858	5,613	202.128	660	19,870	14,383	229.430
280	8,150	5,822	203.191	670	20,197	14,626	229.920
290	8,443	6,032	204.218	680	20,524	14,871	230.405
298	8,682	6,203	205.033	690	20,854	15,116	230.885
300	8,736	6,242	205.213	700	21,184	15,364	231.358
310	9,030	6,453	206.177	710	21,514	15,611	231.827
320	9,325	6,664	207.112	720	21,845	15,859	232.291
330	9,620	6,877	208.020	730	22,177	16,107	232.748
340	9,916	7,090	208.904	740	22,510	16,357	233.201
350	10,213	7,303	209.765	750	22,844	16,607	233.649
360	10,511	7,518	210.604	760	23,178	16,859	234.091
370	10,809	7,733	211.423	770	23,513	17,111	234.528
380	11,109	7,949	212.222	780	23,850	17,364	234.960
390	11,409	8,166	213.002	790	24,186	17,618	235.387
400	11,711	8,384	213.765	800	24,523	17,872	235.810
410	12,012	8,603	214.510	810	24,861	18,126	236.230
420	12,314	8,822	215.241	820	25,199	18,382	236.644
430	12,618	9,043	215.955	830	25,537	18,637	237.055
440	12,923	9,264	216.656	840	25,877	18,893	237.462
450	13,228	9,487	217.342	850	26,218	19,150	237.864
460	13,535	9,710	218.016	860	26,559	19,408	238.264
470	13,842	9,935	218.676	870	26,899	19,666	238.660
480	14,151	10,160	219.326	880	27,242	19,925	239.051
490	14,460	10,386	219.963	890	27,584	20,185	239.439
500	14,770	10,614	220.589	900	27,928	20,445	239.823
510	15,082	10,842	221.206	910	28,272	20,706	240.203
520	15,395	11,071	221.812	920	28,616	20,967	240.580
530	15,708	11,301	222.409	930	28,960	21,228	240.953
540	16,022	11,533	222.997	940	29,306	21,491	241.323
550	16,338	11,765	223.576	950	29,652	21,754	241.689
560	16,654	11,998	224.146	960	29,999	22,017	242.052
570	16,971	12,232	224.708	970	30,345	22,280	242.411
580	17,290	12,467	225.262	980	30,692	22,544	242.768
590	17,609	12,703	225.808	990	31,041	22,809	243.120

T	h	u	s°	T	h	u	s°
1000	31,389	23,075	243.471	1760	58,880	44,247	263.861
1020	32,088	23,607	244.164	1780	59,624	44,825	264.283
1040	32,789	24,142	244.844	1800	60,371	45,405	264.701
1060	33,490	24,677	245.513	1820	61,118	45,986	265.113
1080	34,194	25,214	246.171	1840	61,866	46,568	265.521
1100	34,899	25,753	246.818	1860	62,616	47,151	265.925
1120	35,606	26,294	247.454	1880	63,365	47,734	266.326
1140	36,314	26,836	248.081	1900	64,116	48,319	266.722
1160	37,023	27,379	248.698	1920	64,868	48,904	267.115
1180	37,734	27,923	249.307	1940	65,620	49,490	267.505
1200	38,447	28,469	249.906	1960	66,374	50,078	267.891
1220	39,162	29,018	250.497	1980	67,127	50,665	268.275
1240	39,877	29,568	251.079	2000	67,881	51,253	268.655
1260	40,594	30,118	251.653	2050	69,772	52,727	269.588
1280	41,312	30,670	252.219	2100	71,668	54,208	270.504
1300	42,033	31,224	252.776	2150	73,573	55,697	271.399
1320	42,753	31,778	253.325	2200	75,484	57,192	272.278
1340	43,475	32,334	253.868	2250	77,397	58,690	273.136
1360	44,198	32,891	254.404	2300	79,316	60,193	273.981
1380	44,923	33,449	254.932	2350	81,243	61,704	274.809
1400	45,648	34,008	255.454	2400	83,174	63,219	275.625
1420	46,374	34,567	255.968	2450	85,112	64,742	276.424
1440	47,102	35,129	256.475	2500	87,057	66,271	277.207
1460	47,831	35,692	256.978	2550	89,004	67,802	277.979
1480	48,561	36,256	257.474	2600	90,956	69,339	278.738
1500	49,292	36,821	257.965	2650	92,916	70,883	279.485
1520	50,024	37,387	258.450	2700	94,881	72,433	280.219
1540	50,756	37,952	258.928	2750	96,852	73,987	280.942
1560	51,490	38,520	259.402	2800	98,826	75,546	281.654
1580	52,224	39,088	259.870	2850	100,808	77,112	282.357
1600	52,961	39,658	260.333	2900	102,793	78,682	283.048
1620	53,696	40,227	260.791	2950	104,785	80,258	283.728
1640	54,434	40,799	261.242	3000	106,780	81,837	284.399
1660	55,172	41,370	261.690	3050	108,778	83,419	285.060
1680	55,912	41,944	262.132	3100	110,784	85,009	285.713
1700	56,652	42,517	262.571	3150	112,795	86,601	286.355
1720	57,394	43,093	263.005	3200	114,809	88,203	286.989
1740	58,136	43,669	263.435	3250	116,827	89,804	287.614

Fuente: basado en los datos de las JANAF Thermochemical Tables, NSRDS-NBS-37, 1971.

Anexo H. Entalpía, energía interna y entropía absoluta del dióxido de carbono (CO₂) como gas ideal. $h_f = -393,520$ KJ/kgmol T, K; h y u , KJ/(kgmol.K)

T	h	u	s ^o	T	h	u	s ^o
0	0	0	0	600	22,280	17,291	243.199
220	6,601	4,772	202.966	610	22,754	17,683	243.983
230	6,938	5,026	204.464	620	23,231	18,076	244.758
240	7,280	5,285	205.920	630	23,709	18,471	245.524
250	7,627	5,548	207.337	640	24,190	18,869	246.282
260	7,979	5,817	208.717	650	24,674	19,270	247.032
270	8,335	6,091	210.062	660	25,160	19,672	247.773
280	8,697	6,369	211.376	670	25,648	20,078	248.507
290	9,063	6,651	212.660	680	26,138	20,484	249.233
298	9,364	6,885	213.685	690	26,631	20,894	249.952
300	9,431	6,939	213.915	700	27,125	21,305	250.663
310	9,807	7,230	215.146	710	27,622	21,719	251.368
320	10,186	7,526	216.351	720	28,121	22,134	252.065
330	10,570	7,826	217.534	730	28,622	22,552	252.755
340	10,959	8,131	218.694	740	29,124	22,972	253.439
350	11,351	8,439	219.831	750	29,629	23,393	254.117
360	11,748	8,752	220.948	760	30,135	23,817	254.787
370	12,148	9,068	222.044	770	30,644	24,242	255.452
380	12,552	9,392	223.122	780	31,154	24,669	256.110
390	12,960	9,718	224.182	790	31,665	25,097	256.762
400	13,372	10,046	225.225	800	32,179	25,527	257.408
410	13,787	10,378	226.250	810	32,694	25,959	258.048
420	14,206	10,714	227.258	820	33,212	26,394	258.682
430	14,628	11,053	228.252	830	33,730	26,829	259.311
440	15,054	11,393	229.230	840	34,251	27,267	259.934
450	15,483	11,742	230.194	850	34,773	27,706	260.551
460	15,916	12,091	231.144	860	35,296	28,125	261.164
470	16,351	12,444	232.080	870	35,821	28,588	261.770
480	16,791	12,800	233.004	880	36,347	29,031	262.371
490	17,232	13,158	233.916	890	36,876	29,476	262.968
500	17,678	13,521	234.814	900	37,405	29,922	263.559
510	18,126	13,885	235.700	910	37,935	30,369	264.146
520	18,576	14,253	236.575	920	38,467	30,818	264.728
530	19,029	14,622	237.439	930	39,000	31,268	265.304
540	19,485	14,996	238.292	940	39,535	31,719	265.877
550	19,945	15,372	239.135	950	40,070	32,171	266.444
560	20,407	15,751	239.962	960	40,607	32,625	267.007
570	20,870	16,131	240.789	970	41,145	33,081	267.566
580	21,337	16,515	241.602	980	41,685	33,537	268.119
590	21,807	16,902	242.405	990	42,226	33,995	268.670

T	h	u	s^0	T	h	u	s^0
1000	42,769	34,455	269.215	1760	86,420	71,787	301.543
1020	43,859	35,378	270.293	1780	87,612	72,812	302.271
1040	44,953	36,306	271.354	1800	88,806	73,840	302.884
1060	46,051	37,238	272.400	1820	90,000	74,868	303.544
1080	47,153	38,174	273.430	1840	91,196	75,897	304.198
1100	48,258	39,112	274.445	1860	92,394	76,929	304.845
1120	49,369	40,057	275.444	1880	93,593	77,962	305.487
1140	50,484	41,006	276.430	1900	94,793	78,996	306.122
1160	51,602	41,957	277.403	1920	95,995	80,031	306.751
1180	52,724	42,913	278.362	1940	97,197	81,067	307.374
1200	53,848	43,871	279.307	1960	98,401	82,105	307.992
1220	54,977	44,834	280.238	1980	99,606	83,144	308.604
1240	56,108	45,799	281.158	2000	100,804	84,185	309.210
1260	57,244	46,768	282.066	2050	103,835	86,791	310.701
1280	58,381	47,739	282.962	2100	106,864	89,404	312.160
1300	59,522	48,713	283.847	2150	109,898	92,023	313.589
1320	60,666	49,691	284.722	2200	112,939	94,648	314.988
1340	61,813	50,672	285.586	2250	115,984	97,277	316.356
1360	62,963	51,656	286.439	2300	119,035	99,912	317.695
1380	64,116	52,643	287.283	2350	122,091	102,552	319.011
1400	65,271	53,631	288.106	2400	125,152	105,197	320.302
1420	66,427	54,621	288.934	2450	128,219	107,849	321.566
1440	67,586	55,614	289.743	2500	131,290	110,504	322.808
1460	68,748	56,609	290.542	2550	134,368	113,166	324.026
1480	69,911	57,606	291.333	2600	137,449	115,832	325.222
1500	71,078	58,606	292.114	2650	140,533	118,500	326.396
1520	72,246	59,609	292.888	2700	143,620	121,172	327.549
1540	73,417	60,613	292.654	2750	146,713	123,849	328.684
1560	74,590	61,620	294.411	2800	149,808	126,528	329.800
1580	76,767	62,630	295.161	2850	152,908	129,212	330.896
1600	76,944	63,741	295.901	2900	156,009	131,898	331.975
1620	78,123	64,653	296.632	2950	159,117	134,589	333.037
1640	79,303	65,668	297.356	3000	162,226	137,283	334.084
1660	80,486	66,592	298.072	3050	165,341	139,982	335.114
1680	81,670	67,702	298.781	3100	168,456	142,681	336.126
1700	82,856	68,721	299.482	3150	171,576	145,385	337.124
1720	84,043	69,742	300.177	3200	174,695	148,089	338.109
1740	85,231	70,764	300.863	3250	177,822	150,801	339.069

Fuente: basado en los datos de las JANAF Thermochemical Tables, NSRDS-NBS-37, 1971.

Anexo I. Entalpía, energía interna y entropía absoluta del agua (H₂O).

? $h_f = -241,820$ KJ/kgmol T, K; h y u , KJ/(kgmol.K)

T	h	u	s^0	T	h	u	s^0
0	0	0	0	600	20,402	15,413	212.920
220	7,295	5,466	178.576	610	20,765	15,693	213.529
230	7,628	5,715	180.054	620	21,130	15,975	214.122
240	7,961	5,965	181.471	630	21,495	16,257	214.707
250	8,294	6,215	182.831	640	21,862	16,541	215.285
260	8,627	6,466	184.139	650	22,230	16,826	215.856
270	8,961	6,716	185.399	660	22,600	17,112	216.419
280	9,296	6,968	186.616	670	22,970	17,399	216.976
290	9,631	7,219	187.791	680	23,342	17,688	217.527
298	9,904	7,425	188.720	690	23,714	17,978	218.071
300	9,966	7,472	188.928	700	24,088	18,268	218.610
310	10,302	7,725	190.030	710	24,464	18,561	219.142
320	10,639	7,978	191.098	720	24,840	18,854	219.668
330	10,976	8,232	192.136	730	25,218	19,148	220.189
340	11,314	8,487	193.144	740	25,597	19,444	220.707
350	11,652	8,742	194.125	750	25,977	19,741	221.215
360	11,992	8,998	195.081	760	26,358	20,039	221.720
370	12,331	9,255	196.012	770	26,741	20,339	222.221
380	12,672	9,513	196.920	780	27,125	20,639	222.717
390	13,014	9,771	197.807	790	27,510	20,941	223.207
400	13,356	10,030	198.673	800	27,896	21,245	223.693
410	13,699	10,290	199.521	810	28,284	21,549	224.174
420	14,043	10,551	200.350	820	28,672	21,855	224.651
430	14,388	10,813	201.160	830	29,062	22,162	225.123
440	14,734	11,075	201.955	840	29,454	22,470	225.592
450	15,080	11,339	202.734	850	29,846	22,779	226.057
460	15,428	11,603	203.497	860	30,240	23,090	226.517
470	15,777	11,869	204.247	870	30,635	23,402	226.973
480	16,126	12,135	204.982	880	31,032	23,715	227.426
490	16,477	12,403	205.705	890	31,429	24,029	227.875
500	16,828	12,671	206.413	900	31,828	24,345	228.321
510	17,181	12,940	207.112	910	32,228	24,662	228.763
520	17,534	13,211	207.799	920	32,629	24,980	229.202
530	17,889	13,482	208.475	930	33,032	25,300	229.637
540	18,245	13,755	209.139	940	33,436	25,621	230.070
550	18,601	14,028	209.795	950	33,841	25,943	230.499
560	18,959	14,303	210.440	960	34,247	26,265	230.924
570	19,318	14,579	211.075	970	34,653	26,588	231.347
580	19,678	14,856	211.702	980	35,061	26,913	231.767
590	20,039	15,134	212.320	990	35,472	27,240	232.184

T	h	u	s°	T	h	u	s°
1000	35,882	27,568	232.597	1760	70,535	55,902	258.151
1020	36,709	28,228	233.415	1780	71,523	56,723	258.708
1040	37,542	28,895	234.223	1800	72,513	57,547	259.262
1060	38,380	29,567	235.020	1820	73,507	58,375	259.811
1080	39,223	30,243	235.806	1840	74,506	59,207	260.357
1100	40,071	30,925	236.584	1860	75,506	60,042	260.898
1120	40,923	31,611	237.352	1880	76,511	60,880	261.436
1140	41,780	32,301	238.110	1900	77,517	61,720	261.969
1160	42,642	32,997	238.859	1920	78,527	62,564	262.497
1180	43,509	33,698	239.600	1940	79,540	63,411	263.022
1200	44,380	34,403	240.333	1960	80,555	64,259	263.542
1220	45,256	35,112	241.057	1980	81,573	65,111	264.059
1240	46,137	35,827	241.773	2000	82,593	65,965	264.571
1260	47,022	36,546	242.482	2050	85,156	68,111	265.838
1280	47,912	37,270	243.183	2100	87,735	70,275	267.081
1300	48,807	38,000	243.877	2150	90,330	72,454	268.301
1320	49,707	38,732	244.564	2200	92,940	74,649	269.500
1340	50,612	39,470	245.243	2250	95,562	76,855	270.679
1360	51,521	40,213	245.915	2300	98,199	79,076	271.839
1380	52,434	40,960	246.582	2350	100,846	81,308	272.978
1400	53,351	41,711	247.241	2400	103,508	83,553	274.098
1420	54,273	42,466	247.895	2450	106,183	85,811	275.201
1440	55,198	43,226	248.543	2500	108,868	88,082	276.286
1460	56,128	43,989	249.185	2550	111,565	90,364	277.354
1480	57,062	44,756	249.820	2600	114,273	92,656	278.407
1500	57,999	45,528	250.450	2650	116,991	94,958	279.441
1520	58,942	46,304	251.074	2700	119,717	97,269	280.462
1540	59,888	47,084	251.693	2750	122,453	99,588	281.464
1560	60,838	47,868	252.305	2800	125,198	101,917	282.453
1580	61,792	48,655	252.912	2850	127,952	104,256	283.429
1600	62,748	49,445	253.513	2900	130,717	106,605	284.390
1620	63,709	50,240	254.111	2950	133,486	108,959	285.338
1640	64,675	51,039	254.703	3000	136,264	111,321	286.273
1660	65,643	51,841	255.290	3050	139,051	113,692	287.194
1680	66,614	52,646	255.873	3100	141,846	116,072	288.102
1700	67,589	53,455	256.450	3150	144,648	118,458	288.999
1720	68,567	54,267	257.022	3200	147,457	120,851	289.884
1740	69,550	55,083	257.589	3250	150,272	123,250	290.756

Fuente: basado en los datos de las JANAF Thermochemical Tables, NSRDS-NBS-37, 1971.

Anexo J. Datos de capacidad térmica específica de gas ideal para gases selectos, en kJ/(kg.k)

Datos de capacidad térmica específica de gas ideal para gases selectos, en kJ/(kg · K)

1. Capacidades térmicas específicas a presión cero de seis gases comunes, donde $k = c_p/c_v$

Temp., K	c_p	c_v	k	c_p	c_v	k	c_p	c_v	k	Temp., K
	Aire			Dióxido de carbono (CO ₂)			Monóxido de carbono (CO)			
250	1.003	0.716	1.401	0.791	0.602	1.314	1.039	0.743	1.400	250
300	1.005	0.718	1.400	0.846	0.657	1.288	1.040	0.744	1.399	300
350	1.008	0.721	1.398	0.895	0.706	1.268	1.043	0.746	1.398	350
400	1.013	0.726	1.395	0.939	0.750	1.252	1.047	0.751	1.395	400
450	1.020	0.733	1.391	0.978	0.790	1.239	1.054	0.757	1.392	450
500	1.029	0.742	1.387	1.014	0.825	1.229	1.063	0.767	1.387	500
550	1.040	0.753	1.381	1.046	0.857	1.220	1.075	0.778	1.382	550
600	1.051	0.764	1.376	1.075	0.886	1.213	1.087	0.790	1.376	600
650	1.063	0.776	1.370	1.102	0.913	1.207	1.100	0.803	1.370	650
700	1.075	0.788	1.364	1.126	0.937	1.202	1.113	0.816	1.364	700
750	1.087	0.800	1.359	1.148	0.959	1.197	1.126	0.829	1.358	750
800	1.099	0.812	1.354	1.169	0.980	1.193	1.139	0.842	1.353	800
900	1.121	0.834	1.344	1.204	1.015	1.186	1.163	0.866	1.343	900
1000	1.142	0.855	1.336	1.234	1.045	1.181	1.185	0.888	1.335	1000
Temp., K	Hidrógeno (H ₂)			Nitrógeno (N ₂)			Oxígeno (O ₂)			Temp., K
	c_p	c_v	k	c_p	c_v	k	c_p	c_v	k	
250	14.051	9.927	1.416	1.039	0.742	1.400	0.913	0.653	1.398	250
300	14.307	10.183	1.405	1.039	0.743	1.400	0.918	0.658	1.395	300
350	14.427	10.302	1.400	1.041	0.744	1.399	0.928	0.668	1.389	350
400	14.476	10.352	1.398	1.044	0.747	1.397	0.941	0.681	1.382	400
450	14.501	10.377	1.398	1.049	0.752	1.395	0.956	0.696	1.373	450
500	14.513	10.389	1.397	1.056	0.759	1.391	0.972	0.712	1.365	500
550	14.530	10.405	1.396	1.065	0.768	1.387	0.988	0.728	1.358	550
600	14.546	10.422	1.396	1.075	0.778	1.382	1.003	0.743	1.350	600
650	14.571	10.447	1.395	1.086	0.789	1.376	1.017	0.758	1.343	650
700	14.604	10.480	1.394	1.098	0.801	1.371	1.031	0.771	1.337	700
750	14.645	10.521	1.392	1.110	0.813	1.365	1.043	0.783	1.332	750
800	14.695	10.570	1.390	1.121	0.825	1.360	1.054	0.794	1.327	800
900	14.822	10.698	1.385	1.145	0.849	1.349	1.074	0.814	1.319	900
1000	14.983	10.859	1.380	1.167	0.870	1.341	1.090	0.830	1.313	1000

Fuente: datos adaptados de *Tables of Thermal Properties of Gases*, NBS Circular 564, 1955.

2. Datos de capacidad térmica específica para gases monoatómicos

En un amplio intervalo de temperaturas a presiones bajas, las capacidades térmicas específicas c_v y c_p de todos los gases monoatómicos son en esencia independientes de la presión y de la temperatura. Además, en base molar todos los gases monoatómicos tienen el mismo valor tanto para c_p como para c_v en un conjunto de unidades dado. Un conjunto de unidades dado. Un conjunto de valores es

$$c_v = 12.5 \text{ kJ}/(\text{kgmol} \cdot \text{K}) \quad \text{y} \quad c_p = 20.8 \text{ kJ}/(\text{kgmol} \cdot \text{K})$$

Fuente: datos adaptados de *Tables of Thermal Properties of Gases*, NBS Circular, 564, 1955.

3. Ecuaciones de capacidad térmica específica a presión constante para varios gases a presión cero (Unidades del SI)

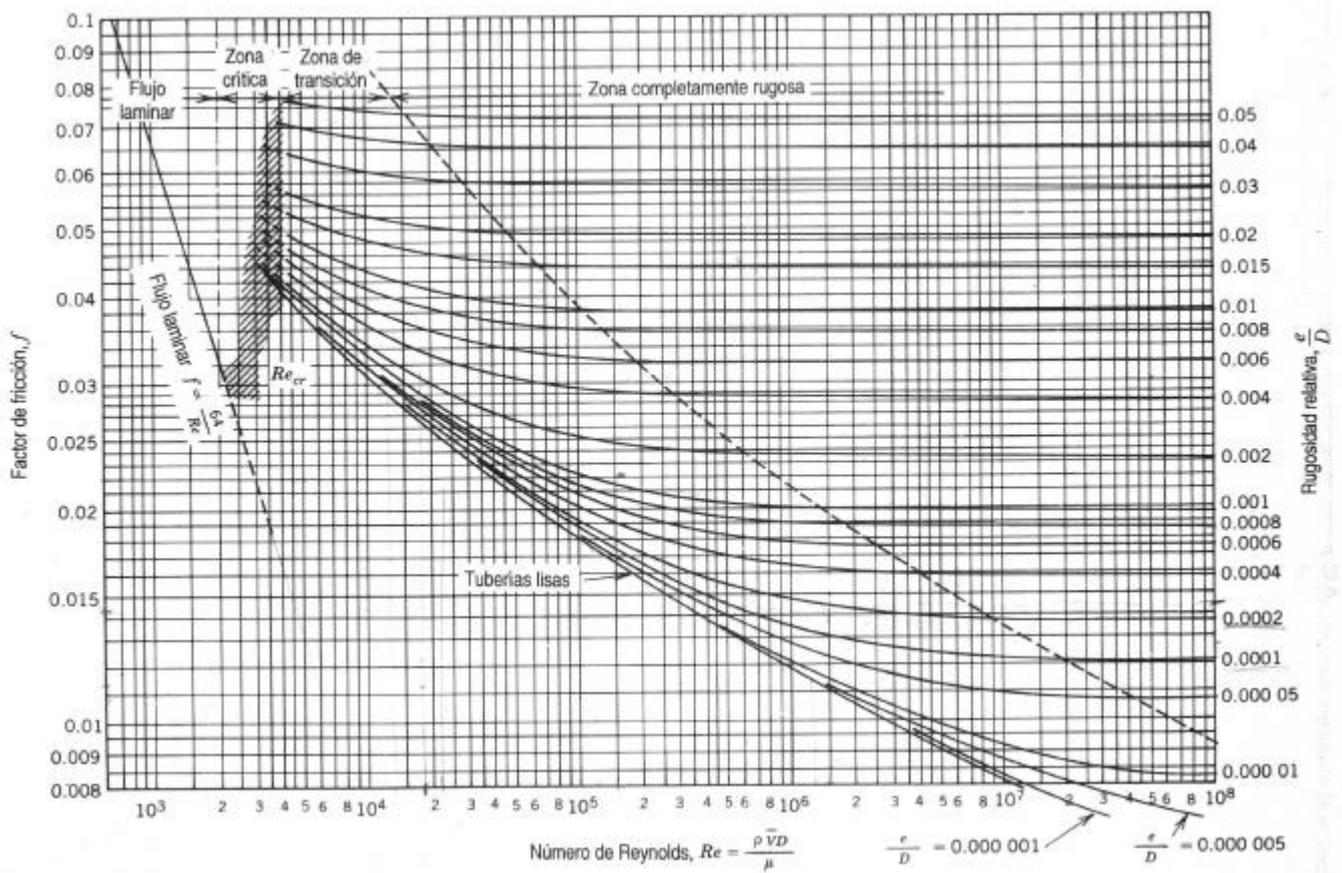
$$\frac{c_p}{R_u} = a + bT + cT^2 + dT^3 + eT^4$$

donde T está en kelvines; ecuación válida de 300 a 1000 K

Gas	a	$b \times 10^3$	$c \times 10^6$	$d \times 10^9$	$e \times 10^{12}$
CO	3.710	-1.619	3.692	-2.032	0.240
CO ₂	2.401	8.735	-6.607	2.002	
H ₂	3.057	2.677	-5.180	5.521	-1.812
H ₂ O	4.070	-1.108	4.152	-2.964	0.807
O ₂	3.626	-1.878	7.056	-6.764	2.156
N ₂	3.675	-1.208	2.324	-0.632	-0.226
Aire (seco)	3.653	-1.334	3.291	-1.910	0.275
NH ₃	3.591	0.494	8.345	-8.383	2.730
NO	4.046	-3.418	7.982	-6.114	1.592
NO ₂	3.459	2.065	6.687	-9.556	3.620
SO ₂	3.267	5.324	0.684	-5.281	2.559
SO ₃	2.578	14.556	-9.176	-0.792	1.971
CH ₄	3.826	-3.979	24.558	-22.733	6.963
C ₂ H ₂	1.410	19.057	-24.501	16.391	-4.135
C ₂ H ₄	1.426	11.383	7.989	-16.254	6.749

Fuente: adaptado de los datos en NASA SP-273, Government Printing Office, Washington, 1971.

Anexo K. Factor de fricción de fanning (f_F) para flujo completamente desarrollado en tuberías circulares. $f = 4 f_F$



Anexo L. Equivalencias de ductos circulares a rectangulares para igual fricción y capacidad

Dimensión del ducto rectangular	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	22	24	26	28	30	
6	6.6																				
7	7.1	7.7																			
8	7.5	8.2	8.8																		
9	8.0	8.6	9.3	9.9																	
10	8.4	9.1	9.8	10.4	10.9																
11	8.8	9.5	10.2	10.8	11.4	12.0															
12	9.1	9.9	10.7	11.3	11.9	12.5	13.1														
13	9.5	10.3	11.1	11.8	12.4	13.0	13.6	14.2													
14	9.8	10.7	11.5	12.2	12.9	13.5	14.2	14.7	15.3												
15	10.1	11.0	11.8	12.6	13.3	14.0	14.6	15.3	15.8	16.4											
16	10.4	11.4	12.2	13.0	13.7	14.4	15.1	15.7	16.3	16.9	17.5										
17	10.7	11.7	12.5	13.4	14.1	14.9	15.5	16.1	16.8	17.4	18.0	18.6									
18	11.0	11.9	12.9	13.7	14.5	15.3	16.0	16.6	17.3	17.9	18.5	19.1	19.7								
19	11.2	12.2	13.2	14.1	14.9	15.6	16.4	17.1	17.8	18.4	19.0	19.6	20.2	20.8							
20	11.5	12.5	13.5	14.4	15.2	15.9	16.8	17.5	18.2	18.8	19.5	20.1	20.7	21.3	21.9						
22	12.0	13.1	14.1	15.0	15.9	16.7	17.6	18.3	19.1	19.7	20.4	21.0	21.7	22.3	22.9	24.1					
24	12.4	13.6	14.6	15.6	16.6	17.5	18.3	19.1	19.8	20.6	21.3	21.9	22.6	23.2	23.9	25.1	26.2				
26	12.8	14.1	15.2	16.2	17.2	18.1	19.0	19.8	20.6	21.4	22.1	22.8	23.5	24.1	24.8	26.1	27.2	28.4			
28	13.2	14.5	15.6	16.7	17.7	18.7	19.6	20.5	21.3	22.1	22.9	23.6	24.4	25.0	25.7	27.1	28.2	29.5	30.6		
30	13.6	14.9	16.1	17.2	18.3	19.3	20.2	21.1	22.0	22.9	23.7	24.4	25.2	25.9	26.7	28.0	29.3	30.5	31.6	32.8	
32	14.0	15.3	16.5	17.7	18.8	19.8	20.8	21.8	22.7	23.6	24.4	25.2	26.0	26.7	27.5	28.9	30.1	31.4	32.6	33.8	
34	14.4	15.7	17.0	18.2	19.3	20.4	21.4	22.4	23.3	24.2	25.1	25.9	26.7	27.5	28.3	29.7	31.0	32.3	33.6	34.8	
36	14.7	16.1	17.4	18.6	19.8	20.9	21.9	23.0	23.9	24.8	25.8	26.6	27.4	28.3	29.0	30.5	32.0	33.0	34.6	35.8	
38	15.0	16.4	17.8	19.0	20.3	21.4	22.5	23.5	24.5	25.4	26.4	27.3	28.1	29.0	29.8	31.4	32.8	34.2	35.5	36.7	
40	15.3	16.8	18.2	19.4	20.7	21.9	23.0	24.0	25.1	26.0	27.0	27.9	28.8	29.7	30.5	32.1	33.6	35.1	36.4	37.6	
42	15.6	17.1	18.5	19.8	21.1	22.3	23.4	24.5	25.6	26.6	27.6	28.5	29.4	30.4	31.2	32.8	34.4	35.9	37.3	38.6	
44	15.9	17.5	18.9	20.2	21.5	22.7	23.9	25.0	26.1	27.2	28.2	29.1	30.0	31.0	31.9	33.5	35.2	36.7	38.1	39.5	
46	16.2	17.8	19.2	20.6	21.9	23.2	24.3	25.5	26.7	27.7	28.7	29.7	30.6	31.6	32.5	34.2	35.9	37.4	38.9	40.3	
48	16.5	18.1	19.6	20.9	22.3	23.6	24.8	26.0	27.2	28.2	29.2	30.2	31.2	32.2	33.1	34.9	36.6	38.2	39.7	41.2	
50	16.8	18.4	19.9	21.3	22.7	24.0	25.2	26.4	27.6	28.7	29.8	30.8	31.8	32.8	33.7	35.5	37.3	38.9	40.4	42.0	
52	17.0	18.7	20.2	21.6	23.1	24.4	25.6	26.8	28.1	29.2	30.3	31.4	32.4	33.4	34.3	36.2	38.0	39.6	41.2	42.8	
54	17.3	19.0	20.5	22.0	23.4	24.8	26.1	27.3	28.5	29.7	30.8	31.9	32.9	33.9	34.9	36.8	38.7	40.3	42.0	43.6	
56	17.6	19.3	20.9	22.4	23.8	25.2	26.5	27.7	28.9	30.1	31.2	32.4	33.4	34.5	35.5	37.4	39.3	41.0	42.7	44.3	
58	17.8	19.5	21.1	22.7	24.2	25.5	26.9	28.2	29.3	30.5	31.7	32.9	33.9	35.0	36.0	38.0	39.8	41.7	43.4	45.0	
60	18.1	19.8	21.4	23.0	24.5	25.8	27.3	28.7	29.8	31.0	32.2	33.4	34.5	35.5	36.5	38.6	40.4	42.3	44.0	45.8	
62	18.3	20.1	21.7	23.3	24.8	26.2	27.6	29.0	30.2	31.4	32.6	33.8	35.0	36.0	37.1	39.2	41.0	42.9	44.7	46.5	
64	18.6	20.3	22.0	23.6	25.2	26.5	27.9	29.3	30.6	31.8	33.1	34.2	35.5	36.5	37.6	39.7	41.6	43.5	45.4	47.2	
66	18.8	20.6	22.3	23.9	25.5	26.9	28.3	29.7	31.0	32.2	33.5	34.7	35.9	37.0	38.1	40.2	42.2	44.1	46.0	47.8	
68	19.0	20.8	22.5	24.2	25.8	27.3	28.7	30.1	31.4	32.6	33.9	35.1	36.3	37.5	38.6	40.7	42.8	44.7	46.6	48.4	
70	19.2	21.1	22.8	24.5	26.1	27.6	29.1	30.4	31.8	33.1	34.3	35.6	36.8	37.9	39.1	41.3	43.3	45.3	47.2	49.0	
72																39.6	41.8	43.8	45.9	47.8	49.7
74																40.0	42.3	44.4	46.4	48.4	50.3
76																40.5	42.8	44.9	47.0	49.0	50.8
78																40.9	43.3	45.5	47.5	49.5	51.3
80																41.3	43.8	46.0	48.0	50.1	52.0
82																41.8	44.2	46.4	48.6	50.6	52.6
84																42.2	44.6	46.9	49.2	51.1	53.2
86																42.6	45.0	47.4	49.6	51.6	53.7
88																43.0	45.4	47.9	50.1	52.2	54.3
90																43.4	45.9	48.3	50.6	52.8	54.9
92																43.8	46.3	48.7	51.1	53.4	55.4
94																44.2	46.7	49.1	51.6	53.9	55.9
96																44.6	47.2	49.5	52.0	54.4	56.3

* Reproducido con permiso de R. G. Huebscher, Trans. ASHVE, Vol. 54 (1948)

ANEXO M. Ventiladores para alta presión tipo T

Ventiladores alta presión tipo “T”. El ventilador a utilizar en el proyecto, es un ventilador tipo turbina modelo 39T100-150, distribuido en Colombia por la empresa Grupo Ambiental Colombiano

Las características de este tipo de ventiladores son:

1. Compactos y eficientes en arreglo 4.
2. Diseñados para trabajo continuo en aplicaciones de alta presión.
3. Operación estable, libre de interrupciones.
4. Presión uniforme en todo su rango de operación.
5. Caudales desde 300 hasta 17400 CFM.
6. Temperatura máxima de operación 180°F

Poseen rotores centrífugos contruidos en acero de alta resistencia, completamente soldados. Balanceados estática y dinámicamente con el más moderno equipo electrónico.

Manguito cónico de fijación, autocentrante. 3 tornillos socket empujan el manguito en la manzana para un perfecto aseguramiento en el eje y un centrado ideal. Provisto de tres perforaciones roscadas en el manguito que su extracción sin ninguna herramienta especial.

Los ventiladores tipo T, proveen presión uniforme a través de todo su rango de operación, con un requerimiento de potencia en relación directa con la cantidad de aire . Una operación estable puede lograrse desde descarga libre hasta un bloqueo total con una compuerta de mariposa en la descarga. Las unidades son diseñadas principalmente para manejar aire, gas, humos y para aplicaciones en procesos industriales relativamente libres de polvos y material. Se acostumbra a utilizar un filtro en la succión para condiciones atmosféricas muy contaminadas. Estos ventiladores están disponibles también en arreglo 8 para condiciones normales de operación y limitadas a temperaturas de hasta 300°F.

Por estas razones el ventilador centrífugo marca GAC MODELO 39T100-150 de 11706P5 de 11600 CFM y SP 55.52” de agua

Tabla 1. Dimensiones generales para arreglo 4

Series	A	B	C	F	G	H	I	J	K	L	M	N	P	R	U	W	X	Y	Z
706	7	6	12 3/8	2 2/16	3 1/16	14 1/8	8 3/4	9 1/8	9 7/8	11	15 3/4	13 3/8		7/8	6 7/8	9 1/16	8 5/8	3 3/16	
710	7	8	12 3/8	4 1/16	4 1/16	15 3/8	8 3/4	9 1/8	9 7/8	11	15 3/4	14 3/8		7/8		9 1/16	8 5/8	4 3/16	
806	8	6	14	3 7/16	3 7/16	15 7/16	9 5/8	10 1/2	11 3/8	12	13	13 11/16		1	5 1/2	9 3/16	9 15/16	3 3/6	
810	8	10	14	3 5/8	3 5/8	17 15/16	9 5/8	10 1/2	11 3/8	12	13	14 13/16		1		9 3/16	9 15/16	4 1/2	
906	9	8	15 1/2	3 3/8	3 3/8	17 7/8	10 5/8	11 3/4	12 3/4	13	18 3/4	17 5/8		1 1/8	6 3/8	12 13/16	11 1/8	3 11/16	
910	9	10		4 5/8	4 5/8	19 1/8	10 5/8	11 3/4	12 3/4	13	18 3/4	18 15/16		1 1/8		12 13/16	11 1/8	5	
1006	10	8	17 1/4	3 3/16	3 3/16	19 3/16	11 7/8	13 1/8	14 1/4	14	16 1/2	19 7/16		1 1/4	7 1/4	14 3/8	12 7/16	3 15/16	
1010	10	12		4 9/16	4 9/16	21 15/16	11 7/8	13 1/8	14 1/4	14		20 7/8		1 1/4		14 3/8	12 7/16	5 3/8	
1106	11	10	18 1/4	4	4	21 9/16	13 1/8	14 1/4	15 1/2	16	18	21 7/8	5 5/16	2 3/4	8	16 7/16	13 9/16	4 5/16	4 5/16
1110	11	12		5 1/2	5 1/2	23 1/16	13 1/8	14 1/4	15 1/2	16	18	23 7/16	6 7/8	2 3/4		16 7/16	13 9/16	5 7/8	5 7/8
D-1306	13	12	17 3/4	4 11/16	6 6/8	25 9/16	16 1/2	16 7/8	18 3/8	18	25	25 15/16	5 7/8	2 3/4	11 1/2	18 15/16	16 1/16	4 7/8	4 7/8
1310	13	14	17 3/4	6 7/16	8 3/8	26 9/16	16 1/2	16 7/8	18 3/8	18	25	27 11/16	7 5/8	2 3/4	11 1/2	18 15/16	16 1/16	6 5/8	6 5/8
D-1406	14	14	23 1/4	5 1/4	7 1/8	27 7/8	16 5/8	18 1/4	19 7/8	21	28 1/2	27 1/2	6 1/8	3	13	21 1/4	17 3/8	5 1/8	5 1/8
D-1506	15	14	24 3/4	5 13/16	7 7/8	29	17 5/4	18 1/4	21 1/4	21	28 1/2	29 1/8	6 7/16	3	13	22 3/16	18 1/2	5 7/16	8 7/16
1510	15	18	24 3/4	8	9 1/2	31	17 5/4	18 1/4	21 1/4	21	28 1/2	31 3/16	8 1/2	3	13	22 3/16	18 1/2	7 1/2	7 1/2
1706	17	16	6 1/4	6 1/4	8	32 3/4	20 1/8	18 1/4	24	25	30 1/2	31 1/8	7	3	14	24	21	6	6

Dimensiones generales de un ventilador tipo turbina modelo 39T100-150. Arreglo 4

ANEXO N. SELECCIÓN DE AISLAMIENTOS TÉRMICOS INDUSTRIALES FIBER GLASS

Existen tres tipos de aislamiento regularmente usados en la industria.

Aislamiento fibroso: Aquellos constituidos por fibras de diámetro muy pequeño, las cuales se dividen en infinito número de espacios de aire, ejemplo de estos tenemos.

- Lana de vidrio
- Lana mineral
- Fibra cerámica

Aislamiento celular: Aquellos constituidos por diminutas celdas individuales, separadas entre sí. Representantes de este tipo de aislantes son.

- Vidrio celular
- Plásticos elastómeros
- Poliuretano

Aislamiento Granular: Aislamientos constituidos por pequeños módulos, los cuales contienen espacios o cavidades vacías, ejemplos.

- Silicato de calcio
- Vermiculita y perlita expandida
- Tierras diatomáceas
- Poliestireno expandido

La selección del aislamiento, se realizará de acuerdo a las condiciones de servicio a la cual se encuentre.

Para temperaturas intermedias 61°F (16°C) a 1000°F (538°C), tenemos los siguientes criterios, para la utilización de aislantes:

- Reducir las pérdidas de calor
- Ahorro y conservación de energía
- Control de procesos
- Protección personal

Las variables de selección para escoger entre los diferentes aislantes que ofrece el mercado, tenemos:

- Eficiencia térmica (factor k)
- Facilidad de instalación

- Resistencia a la compresión
- Costos de instalación

Los tipos de aislamientos recomendados para este tipo de servicio son: Lana de vidrio, lana mineral, silicato de calcio, perlita expandida, vidrio celular.

Teniendo como base la tabla 1, se escoge como la aplicación más apropiada a la Lana de Vidrio, debido a que ofrece un bajo valor del coeficiente de transmisión de calor, ofrece una excelente estabilidad dimensional en comparación con las demás opciones, ya que no se desmorona con la vibración, no es frágil y no es susceptible a los choques térmicos, además es de muy fácil aplicación.

La empresa Fiber Glass S.A. ofrece un producto llamado Pipe Wrap, el cual es un aislamiento térmico especialmente diseñado para cuerpos cilíndricos con diámetros de 10 pulgadas en adelante y equipos que operen entre -60°F (-51°C) y 650°F (343°C). El Pipe Wrap Fiberglass se suministra en rollos con espesores de 2 pulgadas. Se fabrica adheriendo transversalmente una por una, tiras semirrígidas de lana de vidrio sobre un laminado, de tal forma que la fibra queda orientada perpendicularmente al foie de aluminio que sirve de terminado. Esta especial conformación de PIPE Wrap Fiberglass se traduce en una excelente flexibilidad que permite con gran facilidad arropar la superficie de los cuerpos cilíndricos mientras aporta la rigidez necesaria para mantener un espesor uniforme y la resistencia mecánica para hacerlo durable.

Las especificaciones del Pipe Wrap Fiberglass son:

- Conductividad térmica: 0.270 BTU/hr. Ft² (°F/pulg) o sea 0.038 Watt/m °C a 232°C (75°F) de temperatura media.
- Temperatura de aplicación: -60°F a 650°F (-51°C a 343°C)
- No absorción de humedad: Absorbe 0.2% en volumen máximo. (en 96 horas a 120 °F y 95% de humedad relativa).
- Corrosión: Ninguna evidencia sobre metales
- Transmisión de vapor: Del recubrimiento exterior. 0.02 permios máximo
- Incombustibilidad superficial: Clasificación U.L. – USA. Propagación de la llama = 25; desarrollo de humo = 50
- La conductividad térmica esta regida por la norma ASTM C 177-71

Para las condiciones de servicio del ducto transportador, el rango de temperatura a la cual se realizará la operación de secado esta entre 128°C y 326°C, ver sección 4.4.3. . En estas condiciones para seleccionar el espesor recomendado del aislamiento, tenemos en cuenta la temperatura máxima del rango de operación del secador. Siguiendo la tabla 2 del apéndice N, tenemos en cuenta que para una temperatura de operación de 343°C, se recomienda un espesor de aislante de 4.5 pulg (114 mm). Estos datos se obtuvieron teniendo en cuenta para una emisividad de la superficie = 0.2, temperatura ambiente = 25°C, velocidad viento = 0.0 Km/h.

Con este valor de espesor calculamos la velocidad con que el calor se mueve de un área de temperatura más alta a un área de temperatura más baja. Una tubería de acero inoxidable, de diámetro interno de 60 cm (calibra 14), aislada con fibra de vidrio de 11.2 cm (4.5 in) de espesor. La temperatura ambiental T_0 es igual a 26°C. Y la temperatura máxima de operación T_1 326°C.

AISLAMIENTOS TÉRMICOS

CUADRO COMPARATIVO DE PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS

PROPIEDADES	LANA DE VIDRIO	LANA MINERAL	VIDRIO CELULAR	SILICATO DE CALCIO	PERLITA EXPANDIDA	POLIURETANO	POLIESTIRENO
PRESENTACION	CANUELAS, LAMINAS, MANTAS, ACCESORIOS	CANUELAS, LAMINAS, MANTAS	CANUELAS, LAMINAS	CANUELAS, LAMINAS, SEGMENTOS	CANUELAS, LAMINAS	CANUELAS, LAMINAS	CANUELAS, LAMINAS
COMPOSICIÓN	FIBRAS DE VIDRIO SILICEO CON RESINA TERMOESTABLE (Fibras largas)	FIBRAS DE ROCA O ESCORIA IMPUREZAS SÓLIDAS (Fibras cortas)	VIDRIO ESPUMADO SIN AGLUTINANTE	SILICAT HIDRATADO DE CALCIO Y SÍLICE CON FIBRAS DE REFUERZO	SILICATO EXPANDIDO DE PERLITA NATURAL CON FIBRAS DE REFUERZO	POLIMERO ORGANICO	POLIMERO ORGANICOI
AGLUTINANTE ESTRUCTURA DE CELDAS	SI CELDA BIERTA	SI CELDA BIERTA	NO CELDA CERRADA	NO CELDA CERRADA	SI CELDA BIERTA	NO CELDA CERRADA	NO CELDA CERRADA
CONDUCTIVIDAD TÉRMICA (BTU.Pulg. / Hr. Ft ³ .°F)	0.220 a 0.260 a 75°F 0.340 a 300°F	0.240 a 0.340 a 75°F 0.380 a 300°F	0.380 a 50°F 0.400 a 75°F 0.550 a 300°F	0.370 a 75°F 0.430 a 75°F 0.490 a 300°F	0.480 a 200°F 0.520 a 300°F	0.180 a 75°F	0.280 a 75°F
TEMP. DE APLICACIÓN	-120°F a 1000°F -84°C a 538°C	100°F a 1200°F 38°C a 648°C	-350°F a 900°F -212°C a 482°C	100°F a 1200°F (1500°F) 38°C a 649°C (815°C)	-200°F a 1200°F (1500°F) -129°C a 649°C (815°C)	-300°F a 176°F -184°C a 80°C	-150°F a 170°F -101°C a 76°C
ESTABILIDAD QUÍMICA	EXCELENTE (INERTE)	BUENA (INERTE)	EXCELENTE (INERTE)	BUENA	BUENA	ENVEJECE CON EL TIEMPO PIERDE SU PODER AISLANTE	ENVEJECE CON EL TIEMPO PIERDE SU PODER AISLANTE
dENSIDAD (Lbs/ ft ³)	1.08 a 7.0	9.0 a 14.0	9.0	10.0 a 14.5	5.0 a 13.0	2.3	2.2
COMBUSTIBILIDAD	INCOMBUSTIBLE	INCOMBUSTIBLE	INCOMBUSTIBLE	INCOMBUSTIBLE	INCOMBUSTIBLE	QUEMA, PRODUCE HUMO TÓXICO	QUEMA, PRODUCE HUMO TÓXICO
RESISTENCIA COMPRESIÓN Lbs/pulg ² (% Deformación)	1.0 (10%)	1.0 (10%)	100 (5%)	100 a 250 (5%)	90 (5%)	16 a 75 (10%)	
ESTABILIDAD DIMENSIIONAL	EXCELENTE	CON VIBRACIÓN SE DESMORONA	FRÁGIL, SUSCEPTIBLE A CHOQUES TÉRMICOS	FRÁGIL, SUSCEPTIBLE A CHOQUES TÉRMICOS	FRÁGIL, SUSCEPTIBLE A CHOQUES TÉRMICOS	SE DEFORMA	SE DEFORMA
FACILIDAD DE APLICACIÓN	NO NECESITA PEGANTE, MUY LIVIANO, FLEXIBLE	PESADO, USO INCOMODO, REQUIERE SUJECIÓN MALLA METÁLICA	RÍGIDO, DEJA UNIONES Y ESPACIOS VACIOS	RÍGIDO, DEJA UNIONES Y ESPACIOS VACIOS	RÍGIDO, DEJA UNIONES Y ESPACIOS VACIOS	RÍGIDO, DEJA UNIONES Y ESPACIOS VACIOS	RÍGIDO, DEJA UNIONES Y ESPACIOS VACIOS
ALCALINIDAD (pH)	9.0	7.0	7.5	11.0	-	-	-

La longitud del ducto es igual a 30 m.

Aplicando la ley de Fourier

$$\dot{Q} = UA(T_1 - T_0) = \frac{(T_1 - T_0)}{1/UA}$$

Teniendo en cuenta el efecto de convección, volvemos a definir un coeficiente global de transferencia de calor, a través de la siguiente expresión:

$$\frac{1}{UA} = \frac{1}{2\pi L} \left(\frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{k_A} + \frac{1}{r_2 h_c} \right)$$

donde,

$$h_c = 3.66x \frac{k}{D}$$

$$k = 0.0721 \text{ W/m}^\circ\text{C (ASTM C 177-71)}$$

$$r_1 = 30 \text{ cm}$$

$$r_2 = 41.2 \text{ cm}$$

$$L = 30 \text{ cm}$$

$$h_c = 0.1647 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$UA = 9.85 \text{ W/K}$$

Sustituyendo en la ecuación, tenemos que:

$$Q = 2.955 \text{ KW} = 2.543 \text{ kCal/hr}$$

El valor del flujo de calor, corresponde al 0.5% del calor total requerido para realizar la desecación del sólido húmedo en el sistema.

Aislamiento para equipos y superficies planas calientes espesor recomendado en pulgadas*							
Temperatura de operación		Espesor recomendado		Temperatura superficial		Ahorro de energía	Eficiencia de alojamiento
°F	°C	pulg	mm	°F	°C	BTU/hr. m ²	%
150		1.5	38	89	32	1511	93.8
250		3.0	76	94	34	4726	96.9
350		3.0	76	104	40	9115	97.2
450		3.5	89	112	44	15009	97.7
550		4.0	102	119	48	22694	98.1
650		4.5	114	127	53	32537	98.3
750		4.5	114	139	59	44885	98.4
850		5.0	127	147	64	60326	98.6
900		5.5	140	149	65	69376	98.8
950		6.0	152	151	66	79374	98.9

* Tabla suministrada por la empresa Fiber Glass Colombia S.A., bajo criterio Eco (Energy Conservation – USA)