



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**CÁLCULO Y FABRICACIÓN DE SECADOR
PARA AUMENTAR LA PRODUCCIÓN DE Fe_2O_3**

**INFORME DE LA PRÁCTICA PROFESIONAL
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO
P R E S E N T A :
HUMBERTO ARREDONDO CASTRO**



MÉXICO, D.F.

2011



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE:

Profesor: ALEJANDRO ANAYA DURAND

VOCAL:

Profesor: REYNALDO SANDOVAL GONZÁLEZ

SECRETARIO:

Profesor: JOSÉ ANTONIO ORTIZ RAMÍREZ

1er. SUPLENTE:

Profesor: HUMBERTO RANGEL DÁVALOS

2° SUPLENTE:

Profesor: EZEQUIEL MILLÁN VELASCO

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:
QUIMICA COLOR S.A. DE C.V.**

ASESOR DEL TEMA:

M. EN I. JOSÉ ANTONIO ORTIZ RAMÍREZ

SUSTENTANTE:

HUMBERTO ARREDONDO CASTRO

CONTENIDO

PAGINA

| | | |
|----------|---|----|
| 1. | INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 2. | OBJETIVO..... | 3 |
| 3. | TEORÍA DEL SECADO..... | 4 |
| 3.1. | CONTENIDO DE HUMEDAD EN EQUILIBRIO..... | 4 |
| 3.2. | CONDICIONES EXTERNAS COMPRENDIDAS EN EL ESTUDIO DE SECADO..... | 6 |
| 3.3. | PERIODO DE SECADO..... | 6 |
| 3.3.1. | PERIODO DE VELOCIDAD CONSTANTE..... | 17 |
| 3.3.2. | PERIODO DE VELOCIDAD DECRECIENTE..... | 19 |
| 4. | SELECCIÓN DEL EQUIPO DE SECADO..... | 21 |
| 4.1. | SECADOR DE TÚNEL..... | 22 |
| 4.2. | SECADOR DE TRANSPORTE NEUMÁTICO..... | 24 |
| 4.3. | SECADOR ROTATORIO FUEGO DIRECTO..... | 25 |
| 5. | CÁLCULOS PARA EL DISEÑO DE SECADOR..... | 33 |
| 5.1. | CÁLCULO DEL GAS DE ENTRADA AL SECADOR..... | 33 |
| 5.1.1. | CÁLCULO DE LA COMPOSICIÓN DEL AIRE CORRIENTE A..... | 34 |
| 5.1.2. | CÁLCULO DE LA COMPOSICIÓN DEL AIRE CORRIENTE G..... | 36 |
| 5.1.3. | BALANCE DE MATERIA..... | 37 |
| 5.1.4. | BALANCE DE ENERGÍA..... | 38 |
| 5.1.5. | COMPOSICIÓN EN LA SALIDA DEL QUEMADOR..... | 39 |
| 5.2. | ESTIMACIÓN DEL TAMAÑO DE SECADOR..... | 39 |
| 5.2.1. | BALANCE DE MATERIA..... | 40 |
| 5.2.2. | BALANCE DE ENTALPÍA..... | 41 |
| 5.2.2.1. | ENTALPÍA DEL GAS EN LA ENTRADA DEL SECADOR..... | 41 |
| 5.2.2.2. | ENTALPÍA DEL GAS EN LA SALIDA DEL SECADOR..... | 42 |

| | |
|--|----|
| 5.2.2.3. ENTALPÍA DEL SÓLIDO EN LA ENTRADA DEL SECADOR | 42 |
| 5.2.2.4. ENTALPÍA DEL SÓLIDO EN LA SALIDA DEL SECADOR | 42 |
| 5.2.3. PÉRDIDA DE CALOR EN EL TUBO | 43 |
| 5.2.4. COMPOSICIÓN DEL AIRE EN LA ENTRADA DEL SECADOR | 44 |
| 5.2.5. COMPOSICIÓN DEL AIRE EN LA SALIDA DEL SECADOR. | 44 |
| 5.2.6. COMPROBACIÓN DE BALANCE DE MATERIA | 45 |
| 5.2.7. CÁLCULO DE TEMPERATURA DE BULBO HÚMEDO DEL GAS | 46 |
| 5.2.8. CÁLCULO DEL PORCENTAJE DE PÉRDIDA DE CALOR EN CADA ZONA. | 51 |
| 5.2.9. CÁLCULO ZONA I | 52 |
| 5.2.10. CÁLCULO ZONA III. | 53 |
| 5.2.11. CÁLCULO ZONA II. | 53 |
| 5.2.12. HUMEDAD RELATIVA A LA SALIDA DEL SECADOR. | 55 |
| 5.2.13. TEMPERATURA DE ROCÍO A LA SALIDA DEL SECADOR. | 55 |
| 5.2.14. REVOLUCIONES DEL SECADOR. | 55 |
| 5.2.15. GAS LP NECESARIO PARA EL SECADO. | 56 |
| 5.2.16. EFICIENCIA TÉRMICA | 56 |
| 5.2.17. MASA VELOCIDAD DEL AIRE. | 57 |
| 5.2.18. KILOGRAMOS DE AIRE EN LA SALIDA DEL SECADOR. | 57 |
| 5.2.19. VOLUMEN DEL AIRE. | 57 |
| 5.2.20. TIEMPO DE RESIDENCIA. | 57 |
| 5.2.21. DATOS NECESARIOS PARA EL CÁLCULO DEL SECADOR | 58 |
| 5.2.22. RESULTADOS. | 59 |
| 5.2.23. COSTO DE SECADO. | 59 |
| 5.2.24. OPTIMIZACIÓN DEL SECADOR. | 60 |
| 6. FABRICACIÓN DE SECADOR. | 72 |
| 6.1. CUERPO DE SECADOR. | 72 |
| 6.2. TRANSMISIÓN | 76 |
| 6.3. POTENCIA NECESARIA PARA TRANSMISIÓN. | 79 |
| 6.4. CAJA DE HUMO. | 80 |
| 6.5. MOLIENDA Y TRANSPORTE | 82 |
| 6.6. FILTRO PARA EL SECADOR | 85 |

| | |
|----------------------------------|-----|
| 6.7. CONTROL DE TEMPERATURA..... | 88 |
| 7. PRUEBA DE SECADO..... | 90 |
| 8. CONCLUSIONES..... | 95 |
| 9. APÉNDICE A..... | 96 |
| 10. APÉNDICE B..... | 97 |
| 11. APÉNDICE C..... | 98 |
| 12. APÉNDICE D..... | 99 |
| 13. APÉNDICE E..... | 100 |
| 14. BIBLIOGRAFÍA..... | 101 |

1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo fue realizado para una compañía fundada en 1984, dedicada a la elaboración de diversos pigmentos que se utilizan en el ramo de la construcción como: negro de humo, óxido de hierro amarillo, óxido de hierro rojo, café, azul y verde.

Dicha compañía tuvo la necesidad de incrementar la producción de óxido de hierro rojo y el proceso limitante para este propósito es el secado.

En México existen varias empresas dedicadas a la fabricación de secadores, sin embargo los costos para adquirir un equipo de estos, son muy elevados. Después de estudios financieros y tecnológicos de secadores, se llegó a la conclusión que se podía elaborar un secador de fabricación propia.

La compañía contaba en ese momento con una producción de 1,000 kg/semana aproximadamente, y se requería aumentar la producción a 200 Kg/h como mínimo, en un turno de 8 horas, dejando 1 hora para limpieza y arranque, es decir 7,000 kg/semana.

Para construir adecuadamente el secador se tomaron en cuenta ciertos factores:

- Contenido inicial de humedad 30% base húmeda del material.
- Contenido final de humedad máximo 4% del producto.
- Temperatura de secado no mayor de 700°C.
- 200 kg/h de producto seco como mínimo.

- Operación continua debido a que así lo requiere el proceso.
- Proceso siguiente a la desecación: molienda del producto.
- Recuperación de polvos.
- Presión atmosférica de 574 mmHg.

2. OBJETIVO

Seleccionar y construir el secador más adecuado para manejar el mineral Fe_2O_3 , que se pueda adaptar a la continuidad del proceso y generen un producto de las propiedades físicas deseadas.

Secar mineral óxido de hierro con una capacidad de producción de 200 Kg/h, utilizando un material de alto contenido de hierro con una humedad inicial de 30% base húmeda y obtener un material seco con una humedad máxima del 4%.

El proceso de secado debe ser continuo ya que el proceso de molienda así lo requiere.

3. TEORÍA DEL SECADO

El secado de sólidos se refiere a la eliminación o separación de un líquido por conversión en vapor que se separa de un sólido, sin embargo, no se considera como secado la eliminación mecánica de esta humedad o líquido mediante el exprimido o centrifugado⁽²⁾. En este trabajo nos enfocaremos a la eliminación de la humedad del sólido por la evaporación en la superficie en una corriente gaseosa (aire).

3.1. CONTENIDO DE HUMEDAD EN EQUILIBRIO

Supóngase que un sólido húmedo se pone en contacto con una corriente de aire con temperatura y humedad constante y en tal cantidad que las condiciones no varían y que el tiempo de contacto es lo suficientemente largo para que se alcance el equilibrio, en este caso el sólido alcanzará un contenido de humedad definido, que no cambiará con posteriores exposiciones a esta corriente de aire. Este valor se conoce como contenido de humedad de equilibrio del material en las condiciones especificadas.

El contenido de humedad en equilibrio varía con el tipo de material, por ejemplo un sólido insoluble y no poroso tiene un contenido de humedad prácticamente nulo, en lo que se refiere a la masa del sólido, para cualquier humedad y temperatura del aire, por otra parte, ciertos materiales orgánicos de estructura fibrosa o coloidal (madera, papel, tejidos, jabones y cueros) tienen contenidos de humedad de equilibrio que varían regularmente y en

amplias zonas, a medida que la humedad y temperatura del aire con el que están en contacto varía.

Cuando un sólido se deseca ocurren dos procesos fundamentales:

- a) Se transmite calor para evaporar el líquido, este calor puede transmitirse por convección, conducción, radiación o por combinación de estas. Sea cual fuere la modalidad de transmisión de calor, el líquido debe de fluir hacia la superficie expuesta.
- b) La masa se transfiere durante la desecación en forma de líquido o vapor dentro del sólido y como vapor que se desprende en la superficie expuesta. El movimiento de la masa dentro del sólido se debe a un gradiente de concentración de líquido o vapor que depende de las características del sólido.

La transferencia de calor se produce predominantemente por convección o conducción, o ambas, también en todos los secadores se transfiere calor por radiación, sin embargo es raro que éste sea el mecanismo que predomina.

En el caso de secado por convección un gas se sopla sobre la superficie del sólido húmedo proporcionando dos efectos, entregar calor (el coeficiente de transferencia de calor suele ser grande) y eliminar vapor formado.

En el secado por conducción el sólido húmedo se sitúa en un

recipiente calentado externamente, que tiene una salida para eliminar el vapor, generalmente el recipiente se mantiene a presión reducida, con el objeto de aumentar la fuerza impulsora térmica.

En general durante el secado se tiene un mecanismo particular que ejerce control en un lapso dado, dentro del sólido, pero no es extraño encontrar diferentes mecanismos que predominan en tiempos distintos durante el ciclo de secado.

3.2. CONDICIONES EXTERNAS COMPRENDIDAS EN EL ESTUDIO DE SECADO

- Temperatura (aire y sólido)
- Humedad (aire y sólido)
- Estado de subdivisión del sólido
- Corriente de aire (flujo)
- Movimiento del sólido
- Método de sustentación del sólido
- El contacto entre las superficies calientes del sólido mojado.

3.3. PERIODO DE SECADO

Cuando un sólido se seca experimentalmente, casi siempre se obtienen datos que asocian el contenido de humedad con el tiempo, estos datos experimentales se encuentran en las tablas 1, 2 y 3, corresponden a

0.5cm, 1cm y 2cm de espesor del material a secar respectivamente, se obtuvieron haciendo 3 corridas de secado de material húmedo variando el espesor, manteniendo constante el área expuesta, temperatura del aire, humedad del aire y flujo del aire sobre el material. Estos datos se representan gráficamente como el contenido de humedad base seca (W) en función del tiempo, como se muestra en las gráficas 1A, 1B y 1C, estas curvas representan en caso general que los sólidos mojados pierden humedad, primero por evaporación, debido a una superficie saturada del sólido, a lo cual sigue un periodo de evaporación de la superficie no saturada y por último cuando el agua se evapora del interior del sólido.⁽¹⁾

La velocidad de desecación está sujeta a la variación de la humedad en función de tiempo o al contenido de humedad, la variación es más clara haciendo una representación gráfica de dW/dt en función del contenido de humedad base seca (W), gráficas 2A, 2B y 2C, y haciendo otra gráfica dW/dt en función del tiempo, gráficas 3A, 3B y 3C.

TABLA 1

DATOS DE SECADO DE Fe₂O₃ ESPESOR 0.5 CM

CONDICIONES DEL AIRE TBS=64°C Y TBH=25°C, Presión atmosférica 574 mm de Hg

Diámetro de superficie a secar 9.7CM

| LECTURA | TIEMPO MINUTOS | PESO DE LA MUESTRA GRAMOS | PESO MENOS TARA | DIFERENCIA DE PESO | CANTIDAD AGUA | CONTENIDO DE HUMEDAD BASE SECA | DIFERENCIA DE TIEMPO | dw/dt |
|-----------|-------------------|------------------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------|--------------------------------------|-------------------------|-------------|
| 1 | 0 | 71.10 | 65.85 | | 26.50 | 0.6760 | | |
| 2 | 5 | 69.75 | 64.50 | 1.35 | 25.35 | 0.6467 | 5 | 0.27 |
| 3 | 10 | 68.35 | 63.10 | 1.40 | 23.95 | 0.6110 | 5 | 0.28 |
| 4 | 15 | 66.95 | 61.70 | 1.40 | 22.55 | 0.5753 | 5 | 0.28 |
| 5 | 20 | 65.55 | 60.30 | 1.40 | 21.15 | 0.5395 | 5 | 0.28 |
| 6 | 25 | 64.15 | 58.90 | 1.40 | 19.75 | 0.5038 | 5 | 0.28 |
| 7 | 30 | 62.75 | 57.50 | 1.40 | 18.35 | 0.4681 | 5 | 0.28 |
| 8 | 35 | 61.35 | 56.10 | 1.40 | 16.95 | 0.4324 | 5 | 0.28 |
| 9 | 40 | 59.95 | 54.70 | 1.40 | 15.55 | 0.3967 | 5 | 0.28 |
| 10 | 45 | 58.55 | 53.30 | 1.40 | 14.15 | 0.3610 | 5 | 0.28 |
| 11 | 50 | 57.15 | 51.90 | 1.40 | 12.75 | 0.3253 | 5 | 0.28 |
| 12 | 55 | 55.75 | 50.50 | 1.40 | 11.35 | 0.2895 | 5 | 0.28 |
| 13 | 60 | 54.35 | 49.10 | 1.40 | 9.95 | 0.2538 | 5 | 0.28 |
| 14 | 65 | 52.95 | 47.70 | 1.40 | 8.55 | 0.2181 | 5 | 0.28 |
| 15 | 70 | 51.55 | 46.30 | 1.40 | 7.15 | 0.1824 | 5 | 0.28 |
| 16 | 75 | 50.15 | 44.90 | 1.40 | 5.75 | 0.1467 | 5 | 0.28 |
| 17 | 80 | 48.95 | 43.70 | 1.20 | 4.55 | 0.1161 | 5 | 0.24 |
| 18 | 85 | 48.10 | 42.85 | 0.85 | 3.70 | 0.0944 | 5 | 0.17 |
| 19 | 90 | 47.50 | 42.25 | 0.60 | 3.10 | 0.0791 | 5 | 0.12 |
| 20 | 95 | 47.00 | 41.75 | 0.50 | 2.60 | 0.0663 | 5 | 0.10 |
| 21 | 100 | 46.55 | 41.30 | 0.45 | 2.15 | 0.0548 | 5 | 0.09 |
| 22 | 105 | 46.20 | 40.95 | 0.35 | 1.80 | 0.0459 | 5 | 0.07 |
| 23 | 110 | 45.90 | 40.65 | 0.30 | 1.50 | 0.0383 | 5 | 0.06 |
| 24 | 115 | 45.65 | 40.40 | 0.25 | 1.25 | 0.0319 | 5 | 0.05 |
| 25 | 120 | 45.40 | 40.15 | 0.25 | 1.00 | 0.0255 | 5 | 0.05 |
| 26 | 125 | 45.20 | 39.95 | 0.20 | 0.80 | 0.0204 | 5 | 0.04 |
| 27 | 130 | 45.05 | 39.80 | 0.15 | 0.65 | 0.0166 | | |

Peso final del recipiente cortado a 0.5 cm más el material = 45.05g

Se terminó de secar en un horno a 200°C para medir la humedad final, material a secar 39.8g
material seco 39.2g

Agua que había quedado 0.6g entonces tenía al final =0.015306122 g de agua / g de sólido seco
tara = 5.25 g humedad base seca = 1.53%

TABLA 2

DATOS DE SECADO DE Fe₂O₃ ESPESOR 1.0 CM

CONDICIONES DEL AIRE TBS=64°C Y TBH=25°C, Presión atmosférica 574 mm de Hg
Diámetro de superficie a secar 9.7cm

| LECTURA | TIEMPO minutos | PESO DE LA MUESTRA gr | PESO | DIFERENCIA | CANTIDAD | CONTENIDO DE HUMEDAD | DIFERENCIA | dw/dt |
|-----------|-------------------|--------------------------------|---------------|-------------|--------------|----------------------------|------------|-------------|
| | | | MENOS TARA | DE PESO | AGUA | BASE SECA | DE TIEMPO | |
| 1 | 0 | 158.90 | 116.25 | | 46.85 | 0.6751 | | |
| 2 | 5 | 157.60 | 114.95 | 1.30 | 45.55 | 0.6563 | 5 | 0.26 |
| 3 | 10 | 156.20 | 113.55 | 1.40 | 44.15 | 0.6362 | 5 | 0.28 |
| 4 | 15 | 154.70 | 112.05 | 1.50 | 42.65 | 0.6146 | 5 | 0.30 |
| 5 | 20 | 153.00 | 110.35 | 1.70 | 40.95 | 0.5901 | 5 | 0.34 |
| 6 | 25 | 151.30 | 108.65 | 1.70 | 39.25 | 0.5656 | 5 | 0.34 |
| 7 | 30 | 149.60 | 106.95 | 1.70 | 37.55 | 0.5411 | 5 | 0.34 |
| 8 | 35 | 147.90 | 105.25 | 1.70 | 35.85 | 0.5166 | 5 | 0.34 |
| 9 | 40 | 146.20 | 103.55 | 1.70 | 34.15 | 0.4921 | 5 | 0.34 |
| 10 | 45 | 144.50 | 101.85 | 1.70 | 32.45 | 0.4676 | 5 | 0.34 |
| 11 | 50 | 142.80 | 100.15 | 1.70 | 30.75 | 0.4431 | 5 | 0.34 |
| 12 | 55 | 141.10 | 98.45 | 1.70 | 29.05 | 0.4186 | 5 | 0.34 |
| 13 | 60 | 139.40 | 96.75 | 1.70 | 27.35 | 0.3941 | 5 | 0.34 |
| 14 | 65 | 137.70 | 95.05 | 1.70 | 25.65 | 0.3696 | 5 | 0.34 |
| 15 | 70 | 136.00 | 93.35 | 1.70 | 23.95 | 0.3451 | 5 | 0.34 |
| 16 | 75 | 134.30 | 91.65 | 1.70 | 22.25 | 0.3206 | 5 | 0.34 |
| 17 | 80 | 132.60 | 89.95 | 1.70 | 20.55 | 0.2961 | 5 | 0.34 |
| 18 | 85 | 130.90 | 88.25 | 1.70 | 18.85 | 0.2716 | 5 | 0.34 |
| 19 | 90 | 129.20 | 86.55 | 1.70 | 17.15 | 0.2471 | 5 | 0.34 |
| 20 | 95 | 127.50 | 84.85 | 1.70 | 15.45 | 0.2226 | 5 | 0.34 |
| 21 | 100 | 125.90 | 83.25 | 1.60 | 13.85 | 0.1996 | 5 | 0.32 |
| 22 | 105 | 124.50 | 81.85 | 1.40 | 12.45 | 0.1794 | 5 | 0.28 |
| 23 | 110 | 123.30 | 80.65 | 1.20 | 11.25 | 0.1621 | 5 | 0.24 |
| 24 | 115 | 122.15 | 79.50 | 1.15 | 10.10 | 0.1455 | 5 | 0.23 |
| 25 | 120 | 121.15 | 78.50 | 1.00 | 9.10 | 0.1311 | 5 | 0.20 |
| 26 | 125 | 120.25 | 77.60 | 0.90 | 8.20 | 0.1182 | 5 | 0.18 |
| 27 | 130 | 119.50 | 76.85 | 0.75 | 7.45 | 0.1073 | 5 | 0.15 |
| 28 | 135 | 118.80 | 76.15 | 0.70 | 6.75 | 0.0973 | 5 | 0.14 |
| 29 | 140 | 118.10 | 75.45 | 0.70 | 6.05 | 0.0872 | 5 | 0.14 |
| 30 | 145 | 117.55 | 74.90 | 0.55 | 5.50 | 0.0793 | 5 | 0.11 |
| 31 | 150 | 117.05 | 74.40 | 0.50 | 5.00 | 0.0720 | 5 | 0.10 |
| 32 | 155 | 116.60 | 73.95 | 0.45 | 4.55 | 0.0656 | 5 | 0.09 |
| 33 | 160 | 116.20 | 73.55 | 0.40 | 4.15 | 0.0598 | 5 | 0.08 |
| 34 | 165 | 115.80 | 73.15 | 0.40 | 3.75 | 0.0540 | 5 | 0.08 |
| 35 | 170 | 115.45 | 72.80 | 0.35 | 3.40 | 0.0490 | 5 | 0.07 |
| 36 | 175 | 115.10 | 72.45 | 0.35 | 3.05 | 0.0439 | 5 | 0.07 |
| 37 | 180 | 114.80 | 72.15 | 0.30 | 2.75 | 0.0396 | 5 | 0.06 |
| 38 | 185 | 114.60 | 71.95 | 0.20 | 2.55 | 0.0367 | 5 | 0.04 |
| 39 | 190 | 114.40 | 71.75 | 0.20 | 2.35 | 0.0339 | 5 | 0.04 |

CONTINUA TABLA 2

| LECTURA | TIEMPO minutos | PESO DE LA MUESTRA gr | PESO MENOS TARA | DIFERENCIA DE PESO | CANTIDAD AGUA | CONTENIDO DE HUMEDAD BASE SECA | DIFERENCIA DE TIEMPO | dw/dt |
|---------|-------------------|--------------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------|---|-------------------------|-------|
| 40 | 195 | 114.20 | 71.55 | 0.20 | 2.15 | 0.0310 | 5 | 0.04 |
| 41 | 200 | 114.00 | 71.35 | 0.20 | 1.95 | 0.0281 | 5 | 0.04 |
| 42 | 205 | 113.85 | 71.20 | 0.15 | 1.80 | 0.0259 | 5 | 0.03 |
| 43 | 210 | 113.70 | 71.05 | 0.15 | 1.65 | 0.0238 | 5 | 0.03 |
| 44 | 215 | 113.55 | 70.90 | 0.15 | 1.50 | 0.0216 | 5 | 0.03 |
| 45 | 220 | 113.40 | 70.75 | 0.15 | 1.35 | 0.0195 | 5 | 0.03 |
| 46 | 225 | 113.30 | 70.65 | 0.10 | 1.25 | 0.0180 | 5 | 0.02 |
| 47 | 230 | 113.20 | 70.55 | 0.10 | 1.15 | 0.0166 | 5 | 0.02 |
| 48 | 235 | 113.10 | 70.45 | 0.10 | 1.05 | 0.0151 | 5 | 0.02 |
| 49 | 240 | 113.00 | 70.35 | 0.10 | 0.95 | 0.0137 | 5 | 0.02 |
| 50 | 245 | 112.90 | 70.25 | 0.10 | 0.85 | 0.0122 | 5 | 0.02 |
| 51 | 250 | 112.80 | 70.15 | 0.10 | 0.75 | 0.0108 | 5 | 0.02 |
| 52 | 255 | 112.75 | 70.10 | 0.05 | 0.70 | 0.0101 | 5 | 0.01 |
| 53 | 260 | 112.70 | 70.05 | 0.05 | 0.65 | 0.0094 | 5 | 0.01 |
| 54 | 265 | 112.65 | 70.00 | 0.05 | 0.60 | 0.0086 | | |

Peso final del recipiente cortado a 1 cm más el material = 112.65g

Se terminó de secar en un horno a 200°C para medir la humedad final, material a secar = 70g

MATERIAL SECO = 69.4g

Agua que había quedado 0.6g, entonces tenía al final = 0.008645533 g de agua / g de sólido seco

TARA = 42.65g humedad base seca = 0.86%

TABLA 3

DATOS DE SECADO DE Fe₂O₃ ESPESOR DE 2.0 cm

AIRE TBS=64°C Y TBH=25°C, Presión atmosférica 574 mm de Hg
Diámetro de superficie a secar 9.7 cm

| LECTURA | TIEMPO MINUTOS | PESO DE LA MUESTRA | PESO MENOS TARA | DIFERENCIA DE PESO | CANTIDAD AGUA | CONTENIDO DE HUMEDAD BASE SECA | DIFERENCIA DE TIEMPO | dw/dt |
|-----------|-------------------|--------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------|---|-------------------------|-------------|
| 1 | 0 | 277.70 | 242.30 | | 97.65 | 0.6751 | | |
| 2 | 5 | 276.40 | 241.00 | 1.30 | 96.35 | 0.6661 | 5 | 0.26 |
| 3 | 10 | 275.00 | 239.60 | 1.40 | 94.95 | 0.6564 | 5 | 0.28 |
| 4 | 15 | 273.50 | 238.10 | 1.50 | 93.45 | 0.6460 | 5 | 0.30 |
| 5 | 20 | 271.70 | 236.30 | 1.80 | 91.65 | 0.6336 | 5 | 0.36 |
| 6 | 25 | 269.90 | 234.50 | 1.80 | 89.85 | 0.6212 | 5 | 0.36 |
| 7 | 30 | 268.10 | 232.70 | 1.80 | 88.05 | 0.6087 | 5 | 0.36 |
| 8 | 35 | 266.30 | 230.90 | 1.80 | 86.25 | 0.5963 | 5 | 0.36 |
| 9 | 40 | 264.50 | 229.10 | 1.80 | 84.45 | 0.5838 | 5 | 0.36 |
| 10 | 45 | 262.70 | 227.30 | 1.80 | 82.65 | 0.5714 | 5 | 0.36 |
| 11 | 50 | 260.90 | 225.50 | 1.80 | 80.85 | 0.5589 | 5 | 0.36 |
| 12 | 55 | 259.10 | 223.70 | 1.80 | 79.05 | 0.5465 | 5 | 0.36 |
| 13 | 60 | 257.30 | 221.90 | 1.80 | 77.25 | 0.5340 | 5 | 0.36 |
| 14 | 65 | 255.50 | 220.10 | 1.80 | 75.45 | 0.5216 | 5 | 0.36 |
| 15 | 70 | 253.70 | 218.30 | 1.80 | 73.65 | 0.5092 | 5 | 0.36 |
| 16 | 75 | 251.90 | 216.50 | 1.80 | 71.85 | 0.4967 | 5 | 0.36 |
| 17 | 80 | 250.10 | 214.70 | 1.80 | 70.05 | 0.4843 | 5 | 0.36 |
| 18 | 85 | 248.30 | 212.90 | 1.80 | 68.25 | 0.4718 | 5 | 0.36 |
| 19 | 90 | 246.50 | 211.10 | 1.80 | 66.45 | 0.4594 | 5 | 0.36 |
| 20 | 95 | 244.70 | 209.30 | 1.80 | 64.65 | 0.4469 | 5 | 0.36 |
| 21 | 100 | 242.90 | 207.50 | 1.80 | 62.85 | 0.4345 | 5 | 0.36 |
| 22 | 105 | 241.10 | 205.70 | 1.80 | 61.05 | 0.4221 | 5 | 0.36 |
| 23 | 110 | 239.30 | 203.90 | 1.80 | 59.25 | 0.4096 | 5 | 0.36 |
| 24 | 115 | 237.60 | 202.20 | 1.70 | 57.55 | 0.3979 | 5 | 0.34 |
| 25 | 120 | 235.90 | 200.50 | 1.70 | 55.85 | 0.3861 | 5 | 0.34 |
| 26 | 125 | 234.20 | 198.80 | 1.70 | 54.15 | 0.3744 | 5 | 0.34 |
| 27 | 130 | 232.50 | 197.10 | 1.70 | 52.45 | 0.3626 | 5 | 0.34 |
| 28 | 135 | 230.80 | 195.40 | 1.70 | 50.75 | 0.3508 | 5 | 0.34 |
| 29 | 140 | 229.10 | 193.70 | 1.70 | 49.05 | 0.3391 | 5 | 0.34 |
| 30 | 145 | 227.40 | 192.00 | 1.70 | 47.35 | 0.3273 | 5 | 0.34 |
| 31 | 150 | 225.70 | 190.30 | 1.70 | 45.65 | 0.3156 | 5 | 0.34 |
| 32 | 155 | 224.00 | 188.60 | 1.70 | 43.95 | 0.3038 | 5 | 0.34 |
| 33 | 160 | 222.30 | 186.90 | 1.70 | 42.25 | 0.2921 | 5 | 0.34 |
| 34 | 165 | 220.60 | 185.20 | 1.70 | 40.55 | 0.2803 | 5 | 0.34 |
| 35 | 170 | 219.00 | 183.60 | 1.60 | 38.95 | 0.2693 | 5 | 0.32 |
| 36 | 175 | 217.40 | 182.00 | 1.60 | 37.35 | 0.2582 | 5 | 0.32 |
| 37 | 180 | 215.85 | 180.45 | 1.55 | 35.80 | 0.2475 | 5 | 0.31 |
| 38 | 185 | 214.30 | 178.90 | 1.55 | 34.25 | 0.2368 | 5 | 0.31 |
| 39 | 190 | 212.90 | 177.50 | 1.40 | 32.85 | 0.2271 | 5 | 0.28 |

CONTINUA TABLA 3

| LECTURA | TIEMPO MINUTOS | PESO DE LA MUESTRA | PESO MENOS TARA | DIFERENCIA | CANTIDAD | CONTENIDO DE HUMEDAD | DIFERENCIA | dw/dt |
|---------|-------------------|--------------------------|-----------------------|------------|----------|----------------------------|------------|-------|
| | | | | DE PESO | AGUA | BASE SECA | DE TIEMPO | |
| 40 | 195 | 211.50 | 176.10 | 1.40 | 31.45 | 0.2174 | 5 | 0.28 |
| 41 | 200 | 210.15 | 174.75 | 1.35 | 30.10 | 0.2081 | 5 | 0.27 |
| 42 | 205 | 208.90 | 173.50 | 1.25 | 28.85 | 0.1994 | 5 | 0.25 |
| 43 | 210 | 207.75 | 172.35 | 1.15 | 27.70 | 0.19 | 5 | 0.23 |
| 44 | 215 | 206.65 | 171.25 | 1.10 | 26.60 | 0.1839 | 5 | 0.22 |
| 45 | 220 | 205.55 | 170.15 | 1.10 | 25.50 | 0.1763 | 5 | 0.22 |
| 46 | 225 | 204.50 | 169.10 | 1.05 | 24.45 | 0.1690 | 5 | 0.21 |
| 47 | 230 | 203.55 | 168.15 | 0.95 | 23.50 | 0.1625 | 5 | 0.19 |
| 48 | 235 | 202.75 | 167.35 | 0.80 | 22.70 | 0.1569 | 5 | 0.16 |
| 49 | 240 | 201.95 | 166.55 | 0.80 | 21.90 | 0.1514 | 5 | 0.16 |
| 50 | 245 | 201.15 | 165.75 | 0.80 | 21.10 | 0.1459 | 5 | 0.16 |
| 51 | 250 | 200.35 | 164.95 | 0.80 | 20.30 | 0.1403 | 5 | 0.16 |
| 52 | 255 | 199.55 | 164.15 | 0.80 | 19.50 | 0.1348 | 5 | 0.16 |
| 53 | 260 | 198.75 | 163.35 | 0.80 | 18.70 | 0.1293 | 5 | 0.16 |
| 54 | 265 | 197.95 | 162.55 | 0.80 | 17.90 | 0.1237 | 5 | 0.16 |
| 55 | 270 | 197.35 | 161.95 | 0.60 | 17.30 | 0.1196 | 5 | 0.12 |
| 56 | 275 | 196.75 | 161.35 | 0.60 | 16.70 | 0.1155 | 5 | 0.12 |
| 57 | 280 | 196.15 | 160.75 | 0.60 | 16.10 | 0.1113 | 5 | 0.12 |
| 58 | 285 | 195.55 | 160.15 | 0.60 | 15.50 | 0.1072 | 5 | 0.12 |
| 59 | 290 | 194.95 | 159.55 | 0.60 | 14.90 | 0.1030 | 5 | 0.12 |
| 60 | 295 | 194.45 | 159.05 | 0.50 | 14.40 | 0.0996 | 5 | 0.10 |
| 61 | 300 | 193.95 | 158.55 | 0.50 | 13.90 | 0.0961 | 5 | 0.10 |
| 62 | 305 | 193.45 | 158.05 | 0.50 | 13.40 | 0.0926 | 5 | 0.10 |
| 63 | 310 | 193.00 | 157.60 | 0.45 | 12.95 | 0.0895 | 5 | 0.09 |
| 64 | 315 | 192.55 | 157.15 | 0.45 | 12.50 | 0.0864 | 5 | 0.09 |
| 65 | 320 | 192.10 | 156.70 | 0.45 | 12.05 | 0.0833 | 5 | 0.09 |
| 66 | 325 | 191.70 | 156.30 | 0.40 | 11.65 | 0.0805 | 5 | 0.08 |
| 67 | 330 | 191.35 | 155.95 | 0.35 | 11.30 | 0.0781 | 5 | 0.07 |
| 68 | 335 | 191.00 | 155.60 | 0.35 | 10.95 | 0.0757 | 5 | 0.07 |
| 69 | 340 | 190.65 | 155.25 | 0.35 | 10.60 | 0.0733 | 5 | 0.07 |
| 70 | 345 | 190.30 | 154.90 | 0.35 | 10.25 | 0.0709 | 5 | 0.07 |
| 71 | 350 | 189.95 | 154.55 | 0.35 | 9.90 | 0.0684 | 5 | 0.07 |
| 72 | 355 | 189.60 | 154.20 | 0.35 | 9.55 | 0.0660 | 5 | 0.07 |
| 73 | 360 | 189.30 | 153.90 | 0.30 | 9.25 | 0.0639 | 5 | 0.06 |
| 74 | 365 | 189.00 | 153.60 | 0.30 | 8.95 | 0.0619 | 5 | 0.06 |
| 75 | 370 | 188.70 | 153.30 | 0.30 | 8.65 | 0.0598 | 5 | 0.06 |
| 76 | 375 | 188.45 | 153.05 | 0.25 | 8.40 | 0.0581 | 5 | 0.05 |
| 77 | 380 | 188.20 | 152.80 | 0.25 | 8.15 | 0.0563 | 5 | 0.05 |
| 78 | 385 | 187.95 | 152.55 | 0.25 | 7.90 | 0.0546 | 5 | 0.05 |
| 79 | 390 | 187.70 | 152.30 | 0.25 | 7.65 | 0.0529 | 5 | 0.05 |
| 80 | 395 | 187.45 | 152.05 | 0.25 | 7.40 | 0.0512 | 5 | 0.05 |
| 81 | 400 | 187.20 | 151.80 | 0.25 | 7.15 | 0.0494 | 5 | 0.05 |
| 82 | 405 | 186.95 | 151.55 | 0.25 | 6.90 | 0.0477 | 5 | 0.05 |

CONTINUA TABLA 3

| LECTURA | TIEMPO MINUTOS | PESO DE LA MUESTRA | PESO MENOS TARA | DIFERENCIA DE PESO | CANTIDAD AGUA | CONTENIDO | | dw/dt |
|---------|-------------------|--------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------|------------|-------------------------|-------|
| | | | | | | DE HUMEDAD | DIFERENCIA DE TIEMPO | |
| 83 | 410 | 186.75 | 151.35 | 0.20 | 6.70 | 0.0463 | 5 | 0.04 |
| 84 | 415 | 186.55 | 151.15 | 0.20 | 6.50 | 0.0449 | 5 | 0.04 |
| 85 | 420 | 186.35 | 150.95 | 0.20 | 6.30 | 0.0436 | 5 | 0.04 |
| 86 | 425 | 186.15 | 150.75 | 0.20 | 6.10 | 0.0422 | 5 | 0.04 |
| 87 | 430 | 185.95 | 150.55 | 0.20 | 5.90 | 0.0408 | 5 | 0.04 |
| 88 | 435 | 185.80 | 150.40 | 0.15 | 5.75 | 0.0398 | 5 | 0.03 |
| 89 | 440 | 185.65 | 150.25 | 0.15 | 5.60 | 0.0387 | 5 | 0.03 |
| 90 | 445 | 185.50 | 150.10 | 0.15 | 5.45 | 0.0377 | 5 | 0.03 |
| 91 | 450 | 185.35 | 149.95 | 0.15 | 5.30 | 0.0366 | 5 | 0.03 |
| 92 | 455 | 185.20 | 149.80 | 0.15 | 5.15 | 0.0356 | 5 | 0.03 |
| 93 | 460 | 185.05 | 149.65 | 0.15 | 5.00 | 0.0346 | 5 | 0.03 |
| 94 | 465 | 184.90 | 149.50 | 0.15 | 4.85 | 0.0335 | 5 | 0.03 |
| 95 | 470 | 184.75 | 149.35 | 0.15 | 4.70 | 0.0325 | 5 | 0.03 |
| 96 | 475 | 184.60 | 149.20 | 0.15 | 4.55 | 0.0315 | 5 | 0.03 |
| 97 | 480 | 184.45 | 149.05 | 0.15 | 4.40 | 0.0304 | 5 | 0.03 |
| 98 | 485 | 184.35 | 148.95 | 0.10 | 4.30 | 0.0297 | 5 | 0.02 |
| 99 | 490 | 184.25 | 148.85 | 0.10 | 4.20 | 0.0290 | 5 | 0.02 |
| 100 | 495 | 184.15 | 148.75 | 0.10 | 4.10 | 0.0283 | 5 | 0.02 |
| 101 | 500 | 184.05 | 148.65 | 0.10 | 4.00 | 0.0277 | 5 | 0.02 |
| 102 | 505 | 183.95 | 148.55 | 0.10 | 3.90 | 0.0270 | 5 | 0.02 |
| 103 | 510 | 183.85 | 148.45 | 0.10 | 3.80 | 0.0263 | 5 | 0.02 |
| 104 | 515 | 183.80 | 148.40 | 0.05 | 3.75 | 0.0259 | 5 | 0.01 |
| 105 | 520 | 183.75 | 148.35 | 0.05 | 3.70 | 0.0256 | 5 | 0.01 |
| 106 | 525 | 183.70 | 148.30 | 0.05 | 3.65 | 0.0252 | 5 | 0.01 |
| 107 | 530 | 183.65 | 148.25 | 0.05 | 3.60 | 0.0249 | 5 | 0.01 |
| 108 | 535 | 183.60 | 148.20 | 0.05 | 3.55 | 0.0245 | 5 | 0.01 |
| 109 | 540 | 183.55 | 148.15 | 0.05 | 3.50 | 0.0242 | | |

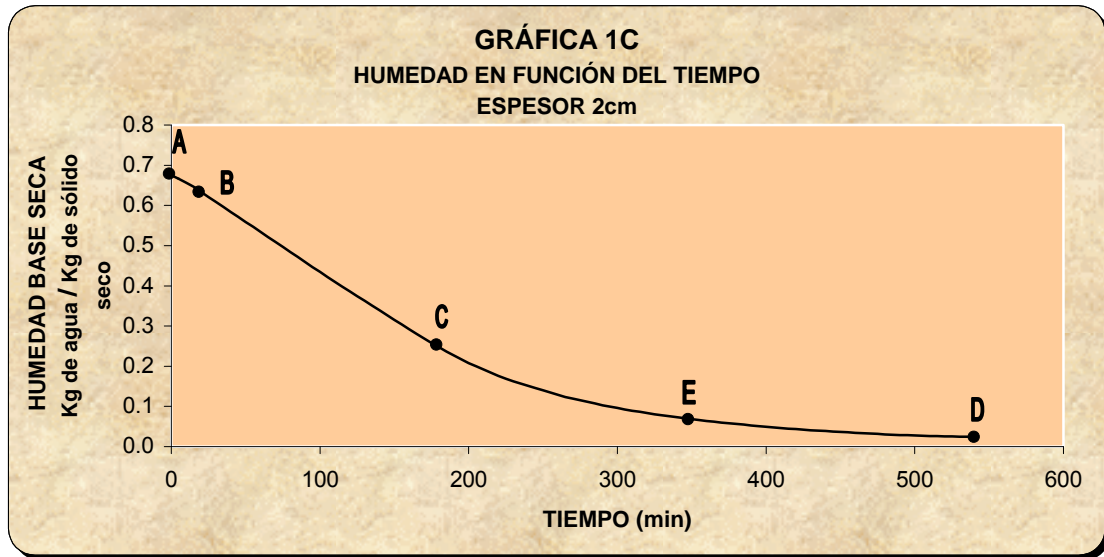
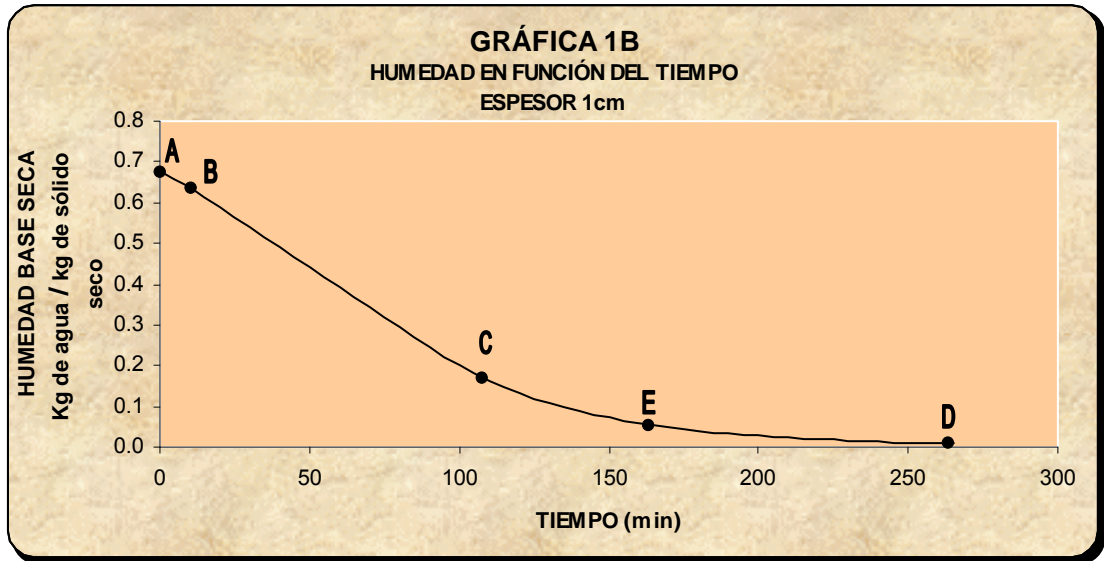
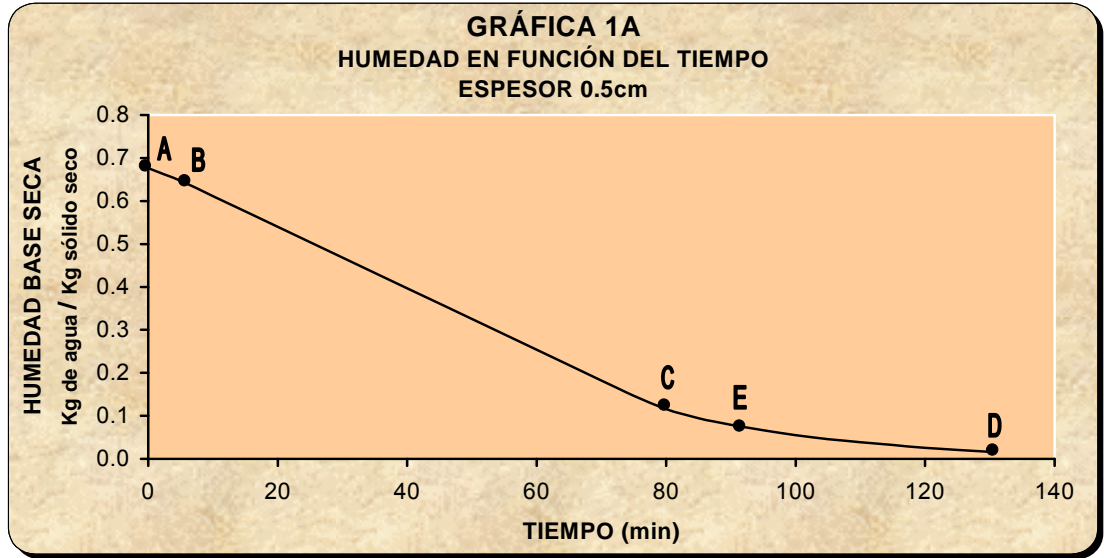
Peso final del recipiente cortado a 2cm de altura más el material = 183.55g

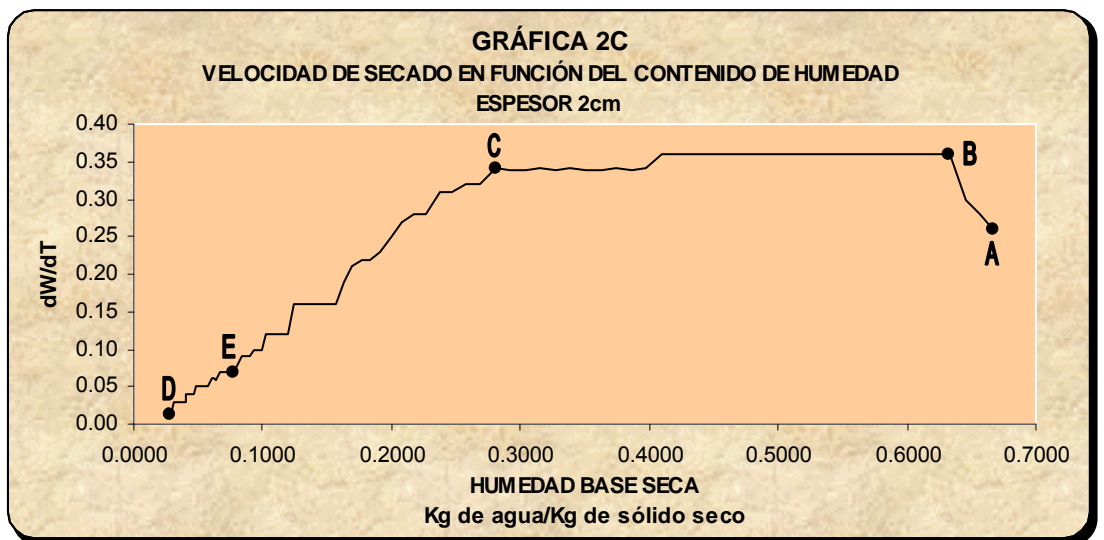
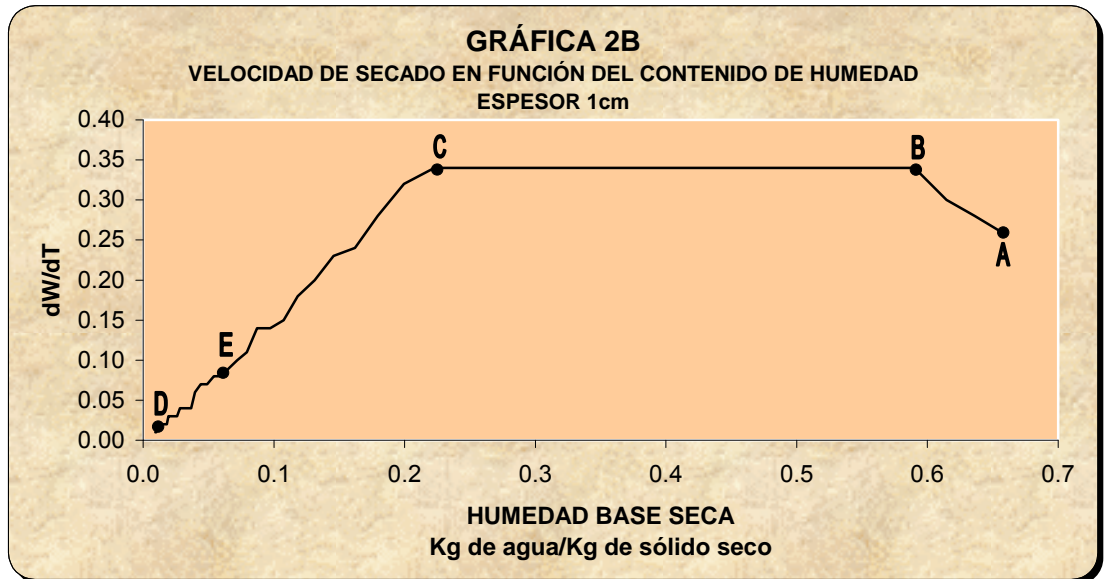
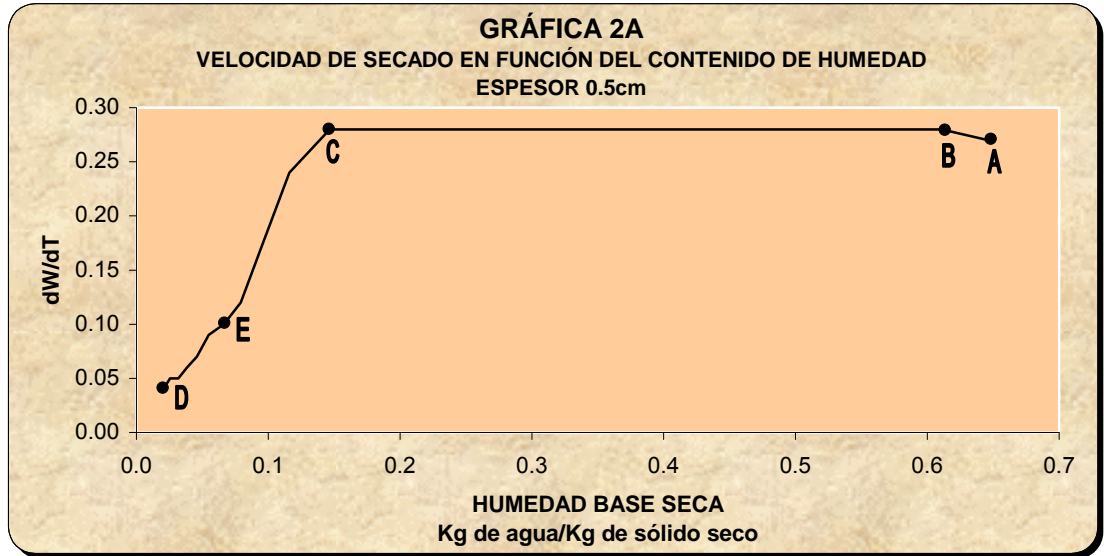
Se terminó de secar en un horno a 200°C para medir la humedad final, material a secar =148.15g

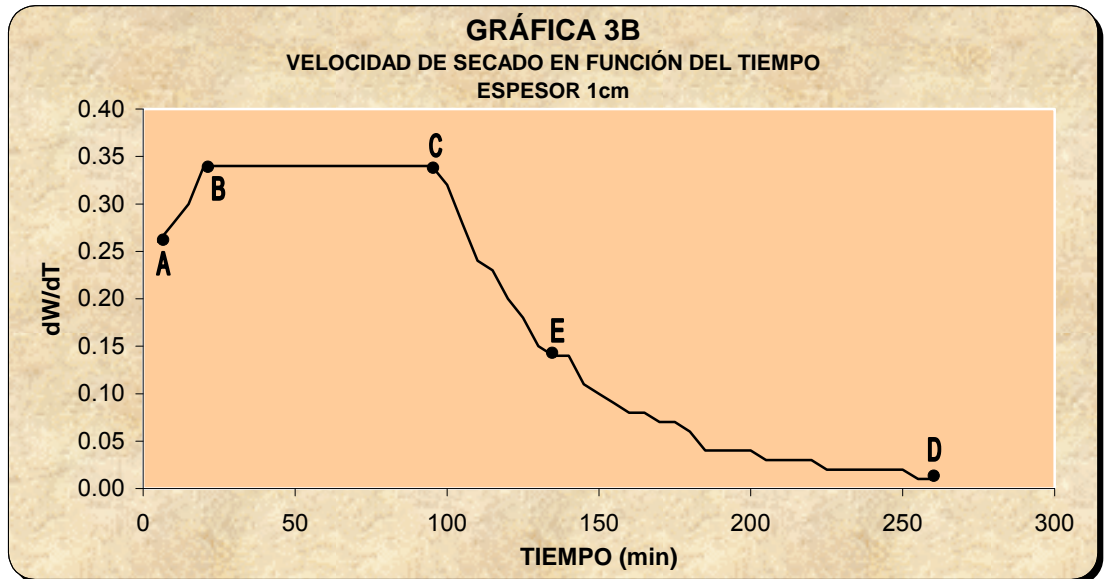
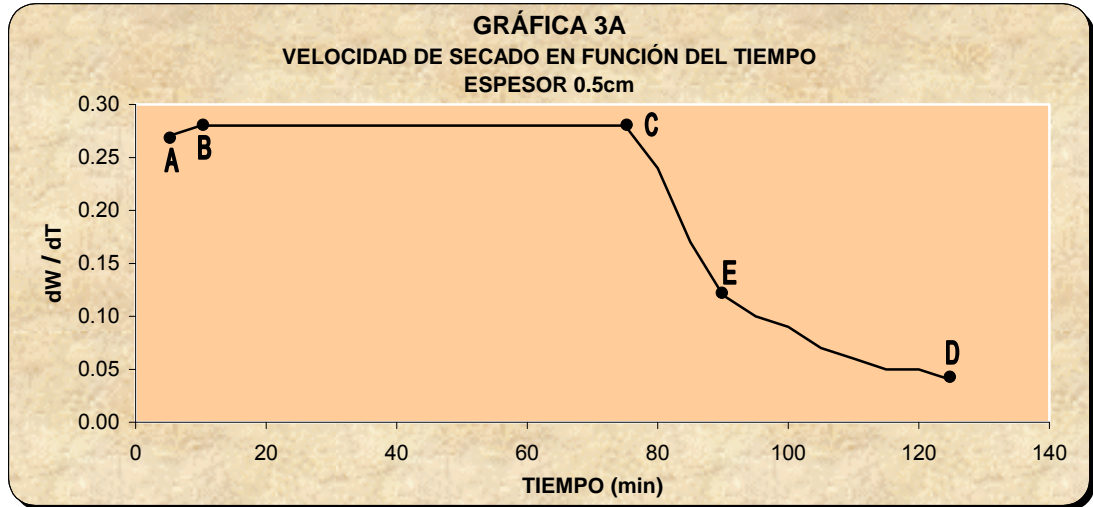
MATERIAL SECO = 144.65g

Agua que había quedado 3.5g entonces tenía al final = 0.02419 g de agua / g de sólido seco

TARA 8.2g humedad base seca 2.4%







Estas curvas de velocidad demuestran que el secado no es un proceso suave y continuo. En las gráficas 3A, 3B y 3C se ve con claridad lo que dura cada periodo del secado. En la sección BC representa un periodo de velocidad constante, en las gráficas 1A, 1B y 1C se representa con una recta de pendiente constante dW/dt y en las gráficas 2A, 2B, 2C, 3A, 3B y 3C se convierte en una línea horizontal. La sección CD se denomina periodo de velocidad decreciente. El punto E representa que toda la superficie expuesta se hace completamente insaturada y marca el principio de la porción del ciclo de secado durante el cual la velocidad de movimiento de la humedad interna controla la velocidad de desecación, **se reduce subdividiendo el material a secar**. El punto C es donde termina la velocidad constante y comienza a descender el índice de desecación, se conoce como contenido de humedad crítico. La sección CE de las gráficas 2A, 2B y 2C se define como el primer periodo de desecación con velocidad decreciente y DE como el segundo periodo de velocidad decreciente. La sección AB representa un lapso de calentamiento. Ahora la limitación de la velocidad de secado está dada principalmente por el coeficiente de transferencia de materia, este hecho nos muestra la existencia de dos etapas de secado, periodo de velocidad constante y periodo de velocidad decreciente.

3.3.1. PERIODO DE VELOCIDAD CONSTANTE

El secado se desarrolla por difusión de vapor desde la superficie saturada del material, pasando por una capa de aire estancado hasta el

medio que lo rodea. El movimiento de la humedad dentro del sólido es lo suficientemente rápida 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. La velocidad de transferencia de masa se equilibra con la velocidad de transmisión de calor y la temperatura de la superficie saturada permanece constante. Si el calor se transfiere exclusivamente por convección la temperatura de la superficie se acerca a la temperatura de bulbo húmedo del aire, cuando el calor se transmite por radiación, conducción o combinación de ambas y convección, la temperatura se ubica entre el bulbo húmedo y la temperatura de ebullición del agua. También si la velocidad de transmisión de calor se incrementa, se obtiene mayor desecación. Cuando se transmite el calor a un sólido húmedo por conducción a través de superficies calientes y la transmisión de calor por convección es despreciable, los sólidos se acercan a la temperatura del punto de ebullición del agua más que a la de bulbo húmedo. Este método de transmisión de calor se utiliza en los secadores indirectos.

La velocidad constante depende de tres factores:

- 1.-Coeficiente de transmisión de calor y transferencia de masa.
- 2.-Área expuesta al medio de secado.
- 3.-Diferencia de temperatura o humedad entre la corriente del gas y la superficie mojada del sólido.

El mecanismo interno del flujo del líquido en el sólido no afecta la velocidad constante, ya que la superficie del material está saturada de agua.

3.3.2. PERIODO DE VELOCIDAD DECRECIENTE

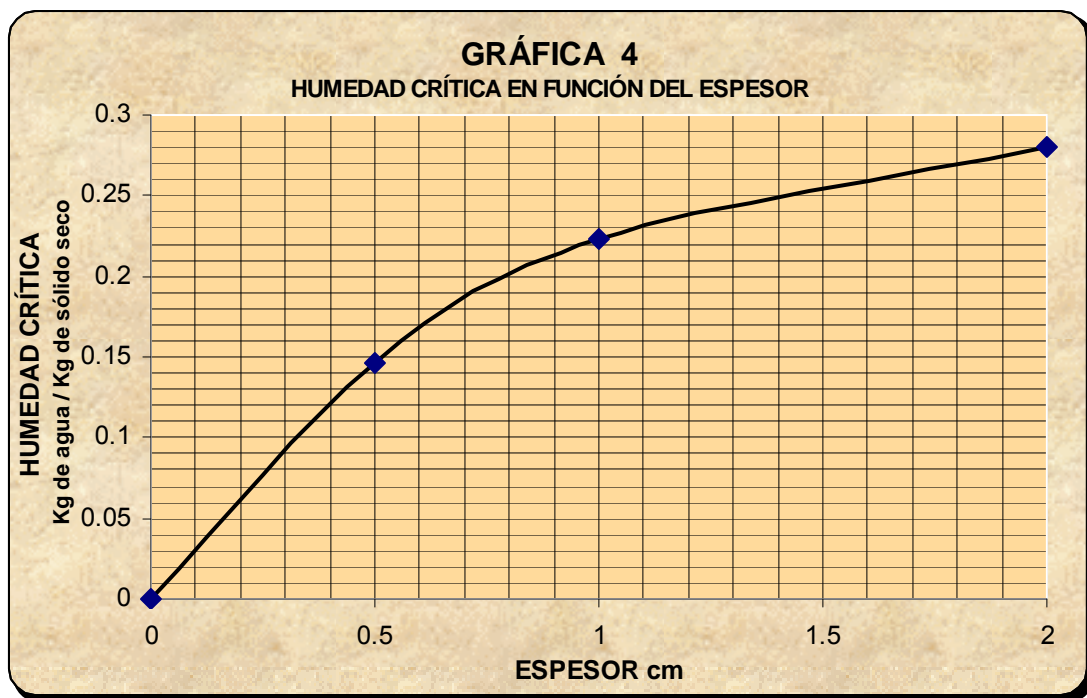
Este periodo comienza al terminar el periodo de velocidad constante. Si el contenido final de humedad es superior al contenido de humedad crítico (para las condiciones de desecación especificadas), todo el proceso de desecación se desarrollará en condiciones de velocidad constante. Y si el contenido inicial de humedad es inferior al crítico, todo el proceso de desecación se desarrollará en el periodo de la velocidad decreciente, este periodo por lo general se divide en dos zonas, la primera zona, no toda la superficie de evaporación se puede mantener saturada, por el movimiento de humedad dentro del sólido. En algunos casos, la velocidad de desecación es una función lineal, como lo señala la línea CE de las gráficas 2A, 2B y 2C. Conforme prosigue la desecación entra a la segunda zona de velocidad decreciente, donde la velocidad de desecación está regida por la velocidad del movimiento interno de la humedad, y la influencia de las variables externas van disminuyendo. Cuando se efectúa una desecación con pequeños contenidos de humedad este periodo predomina casi siempre en la determinación del tiempo total de la desecación.

De los datos experimentales obtenemos una humedad crítica, para cada espesor de material, la humedad del producto no debe de pasar de

4% base húmeda, que equivale a 4.1666% base seca, observamos en la gráfica 4, que si el material a secar se reduce durante el proceso de secado a un diámetro menor de 1.3mm todo el proceso de secado se haría en periodo de velocidad constante.

Datos para la gráfica 4:

| ESPESOR cm | HUMEDAD CRÍTICA Kg de agua / Kg de sólido seco |
|---------------|---|
| 0.50 | 0.1467 |
| 1.00 | 0.2226 |
| 2.00 | 0.2803 |



4. SELECCIÓN DEL EQUIPO DE SECADO

Se debe seleccionar los secadores que sean más adecuados para manejar el material Fe_2O_3 y el producto seco, que se pueda adaptar a la continuidad del proceso y generen un producto de las propiedades físicas deseadas.

Los factores importantes que se deben de 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:

- Mineral de alto contenido de óxido de hierro.
- Material pegajoso.
- No tóxico.
- No muy abrasivo.

b) Características físicas en seco:

- Polvo rojo.
- Densidad 1.3473 g/ml
- No flamable.
- Producto molido. Mayor de 200 mallas.
- Poco abrasivo.

2.- CARACTERÍSTICAS DE DESECACIÓN DEL MATERIAL:

- Contenido inicial de humedad 30% base húmeda.
- Contenido final de humedad máximo 4%.
- Temperatura de secado no mayor de 500°C.

- Tiempo de desecación el más corto.

3.- CIRCULACIÓN DEL MATERIAL QUE ENTRA Y SALE DEL SECADOR:

- 200 kg/h de producto mínimo.
- Deseamos una operación continua.
- Proceso siguiente a la desecación: molienda del producto.

4.- PROBLEMAS EN EL SECADO:

- Adherencia del material húmedo al secador.
- Recuperación de polvos.

LOS SECADORES SELECCIONADOS PARA MANEJAR ESTE MATERIAL SON:

- Túnel.
- Transporte neumático.
- Rotatorio directo.

4.1. SECADOR DE TÚNEL

Los sólidos que se van a secar se colocan en bandejas o carretillas que se desplazan progresivamente a lo largo de un túnel relativamente largo, en donde están en contacto con gases calientes para evaporar la humedad. El tiempo de residencia debe de ser largo. El funcionamiento es semicontinuo, cuando el túnel está lleno, una de las bandejas se saca por el extremo de la descarga al mismo tiempo que se

introduce otra en el extremo de la alimentación, las carretillas o bandejas se desplazan sobre carriles o monorraíles y se mueven por medios mecánicos utilizando cadenas conectadas a la base de cada carretilla. El secador de túnel se descartó ya que los costos de operación son altos, debido al llenado de las bandejas, descarga de las bandejas, recirculación de las bandejas a la zona de llenado, necesita mayor mano de obra. Existen túneles de transportador de banda y transportador de criba que tienen un funcionamiento realmente continuo representan ahorros de mano de obra en comparación con las operaciones de carga y descarga de las bandejas, pero requieren una inversión adicional para los dispositivos automáticos de alimentación y descarga.⁽¹⁾ Por lo tanto por su alto costo de operación e inversión queda descartado.

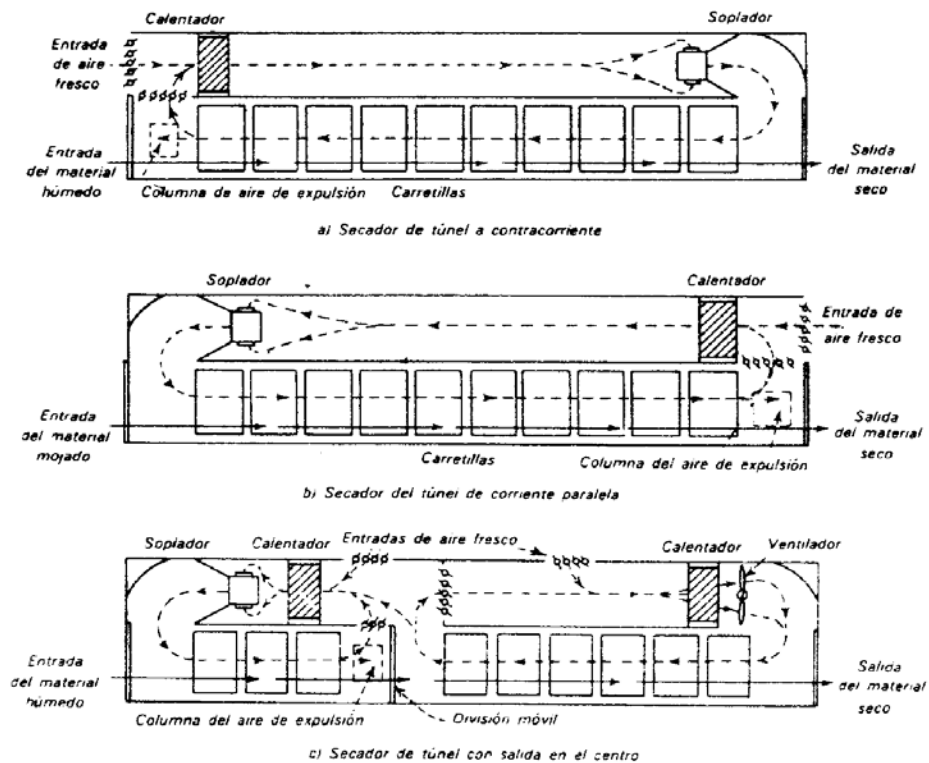


Figura 20-30. Tres tipos de secadores de túnel. [Van Arsdal., *Food Ind.*, 14 (10), 43 (1942).]

4.2. SECADOR 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, en la condición diluida las partículas sólidas están tan dispersas en el gas que aparentemente no manifiestan ningún efecto unas con otras y no ofrecen casi ninguna resistencia al paso del gas entre ellas.⁽¹⁾ Tiene que ser suficiente la cantidad y velocidad del gas para levantar y transportar los sólidos que se oponen a la fuerza de gravedad, el contacto del sólido y el gas es de unos cuantos segundos, es ideal para sólidos sensibles al calor, que no es nuestro caso. Un secador de transporte neumático consta de un tubo o conducto largo que lleva un gas a alta velocidad (25 m/s)⁽²⁾, necesita un ventilador para expulsar el gas, un dosificador apropiado para agregar y dispersar los sólidos en la corriente del gas y un ciclón u otro equipo de separación para la recuperación final de los sólidos del gas.

Se pueden usar varias clases de alimentadores de sólidos, los de tornillo sinfín, secciones venturi, trituradores de alta velocidad y molinos de dispersión. Para el transportador neumático, la elección del alimentador correcto para asegurar una minuciosa dispersión inicial de los sólidos en el gas, constituye un factor de primordial importancia.

Analizando el funcionamiento de estos secadores es importante la alimentación pero como el material a secar contiene impurezas sólidas (piedras) entonces se tendrían problemas en los alimentadores de tornillo sinfín, sección venturi, que se podrían atorar y con respecto a los trituradores y molinos de dispersión, las impurezas sólidas se molerían con

el material y de esta forma bajando su calidad. Por lo tanto también queda descartado este tipo de secador.

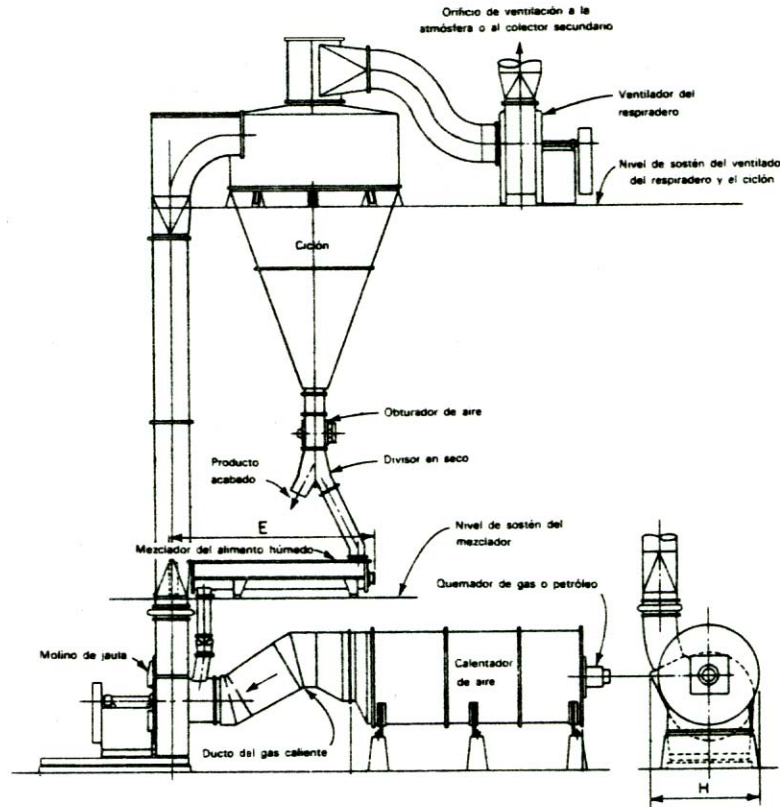


Figura 20-69. Secador de transportador neumático de una sola etapa (*Raymond Division Combustion Engineering, Inc.*)

4.3. SECADOR ROTATORIO DE FUEGO DIRECTO

Forman un grupo muy importante de secadores, son adecuados para manejar materiales granulares de flujo libre que pueden **arrojarse sin temor de romperlos.**

Es obvio que el material a secar no debe ser pegajoso ni chicoso, puesto que podría pegarse en las paredes del secador o tendería a

apelotonarse, en estos casos, la recirculación de una parte del producto seco puede permitir el uso de este secador.

Los secadores rotatorios se fabrican para diversas operaciones, la clasificación siguiente incluye los tipos principales.

1.- calor directo, flujo a contracorriente:

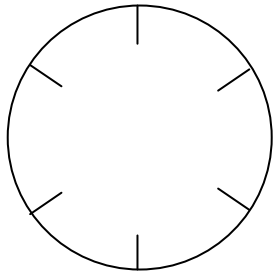
Para materiales que pueden calentarse a temperaturas elevadas, como minerales, arena, piedra caliza, arcillas, etc. Se puede utilizar gases de combustión como gas de secado. Se puede utilizar aire caliente para sustancias que no se pueden calentar demasiado, como el sulfato de amonio o azúcar de caña. En este secador el material a secar entra por un extremo y el aire caliente o gases de combustión entran por el otro lado y se cruzan⁽²⁾.

2.- calor directo, flujo corriente paralela:

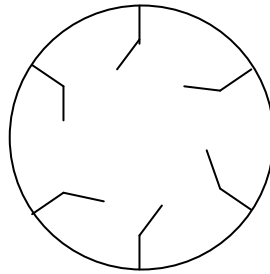
Los sólidos que pueden secarse con gas de combustión sin miedo de contaminarlos, pero que no deben de calentarse a temperaturas muy elevadas por temor a dañarlos, como yeso, **piritas de hierro** y materiales orgánicos. En este secador el gas y el material a secar entran por el mismo extremo del secador⁽²⁾.

Este equipo es un cilindro alargado con una relación de $L/D = 4$ a 10 y contiene en el interior aspas para levantar y dejar caer los sólidos a través de la corriente de aire que pasa a lo largo del cilindro, estas aspas casi siempre tienen una ubicación alterna cada 2 o 6 ft para asegurar una cortina de sólidos más continua y uniforme en el gas⁽¹⁾. La forma de aspas

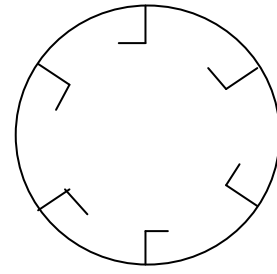
depende de las características del material, en el caso de materiales con movimiento libre, se usan aspas de 90° o por el contrario con materiales pegajosos se usan aspas planas⁽¹⁾.



CILINDRO CON ASPAS PLANAS



CILINDRO CON ASPAS 45°



CILINDRO CON ASPAS 90°

Cuando el material cambia de características durante el paso del cilindro se pueden utilizar los tres tipos de aspas a lo largo del cilindro. En los primeros centímetros de entrada al cilindro casi siempre se instalan aspas espirales para facilitar la entrada del material al cilindro y que no se regrese y evitar de esta manera fugas en el anillo de retén en el extremo de la alimentación. Cuando se usa una corriente paralela de gas-sólido las aspas generalmente no se ponen en los últimos centímetros del cilindro para reducir el arrastre del producto seco en el gas de salida. Para un secador a contracorriente, el polvo en el aire provocado por el movimiento del secador es lavado por el material mojado de alimentación. Algunos secadores están provistos con aspas con dientes de sierra para obtener un lanzamiento uniforme, mientras otros emplean tramos de cadenas unidas al lado inferior de las aspas para raspar y golpear la pared del cilindro, removiendo así los sólidos pegajosos que puedan adherirse a la

pared del cilindro, los sólidos que se adhieren a las aspas y a la pared del cilindro se despegan con mayor eficiencia con golpeadores externos al cilindro.

La altura de las aspas internas varía $1/12$ a $1/18$ del diámetro del secador. El número de aspas oscila de $2D$ a $3D$ $D = \text{ft}$ para secadores con diámetros mayores de 2 ft.⁽¹⁾

El flujo a contracorriente del gas-sólido genera mayor eficiencia de transferencia de calor, pero en el flujo de corriente paralela se utiliza para secar materiales **sensibles al calor y pegajosos** y nos permite utilizar temperatura del gas más elevada, debido al rápido enfriamiento que sufre el gas durante la evaporación inicial de la humedad de la superficie del material.

Cada uno de los extremos del cilindro tienen una caja llamada de humo o terminal y cabezal de entrada estas están selladas con el cilindro móvil, ninguno de estos sellos para sólidos es eficaz y tampoco funcionan satisfactoriamente, pero si la presión interna oscila entre 0.01 y 0.1 pulgadas de agua por debajo de la presión atmosférica se evita la salida de polvo al exterior, los gases se hacen pasar por el cilindro mediante un extractor o una combinación de extractor y ventilador. Con un extractor es posible mantener un control muy preciso de la presión interna del cilindro, incluso cuando la caída de presión total del sistema es importante, casi siempre basta con utilizar un extractor, dado que las principales pérdidas de

presión del gas se localizan en los ductos de salida del aire y en los recolectores de polvo, ciclones, filtros de lonas y lavadores de gases. Rara vez se coloca un ventilador para forzar el paso del aire por el cilindro ya que puede provocar fugas de polvo y aire caliente por los sellos debido a que la presión interna del cilindro sería mayor que la atmosférica⁽¹⁾.

Generalmente la tolva de descarga o caja de humo en un secador de corriente paralela es de mayor tamaño al área transversal del cilindro con el fin de reducir la velocidad del aire y asegurar una mayor retención de sólidos.

Los secadores rotatorios operan entre el 10 al 15% de su volumen del cilindro, un llenado menor sería insuficiente para utilizar plenamente los elevadores.

Si el tiempo que dura el material en el secador es muy breve, podría no ser suficiente para eliminar toda la humedad interna, o bien, si el llenado de los elevadores es incorrecto, el funcionamiento del secador puede ser errático.

El tiempo de residencia en los secadores rotatorios se calcula, aplicando las relaciones que desarrollaron Friedman y Marshall⁽¹⁾ :

$$\text{Tiempo } (\theta) = \frac{0.23 L}{S N^{0.9} D} \pm 0.6 \frac{B L G}{F}$$

$$B = 5 D_p^{-0.5}$$

| | |
|--------------|--|
| B | Constante que depende del material |
| Dp | Tamaño de partícula en micras |
| F | Índice de alimentación al secador lb material seco/h ft ² |
| T (θ) | Tiempo de paso en minutos |
| S | Pendiente del cilindro ft/ft |
| N | Velocidad RPM |
| L | Longitud del cilindro |
| G | masa Velocidad del aire lb/h ft ² |
| D | Diámetro del cilindro ft |
| (-) | Signo menos circulación paralela |

Los secadores funcionan con velocidades periféricas de 50-100 ft/min. Las pendientes varían de 0 y 1 in/ft en algunos casos en corrientes paralelas se usan pendientes negativas. ⁽¹⁾

La masa velocidad del aire en secadores rotatorios varían, por lo común de 400 a 4000 lb/(h)(ft²)₍₁₎. Se debe utilizar la máxima masa velocidad posible pero hay que tener cuidado con el arrastre de polvo que depende del estado físico del material, cantidad de elevadores, velocidad de rotación y la construcción de la caja de humo. Su predicción exacta sólo se logra por medio de pruebas experimentales. En general se puede utilizar

con seguridad una masa velocidad del aire de $1000 \text{ lb} / (\text{h})(\text{ft}^2)$ con sólidos de malla 35⁽¹⁾.

La eficiencia térmica de un secador rotatorio de calor directo para temperaturas elevadas varía del 55-75%, en el caso del aire calentado con vapor varía de 30-55%.⁽¹⁾

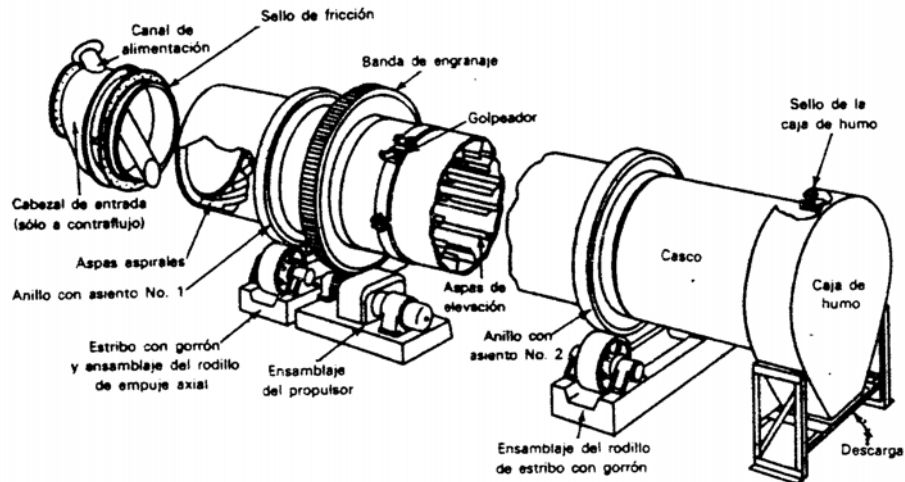


Figura 20-36. Configuración de los componentes de un secador rotatorio a contracorriente y de calor directo (CE Raymond/Bartlett-Snow Co.).

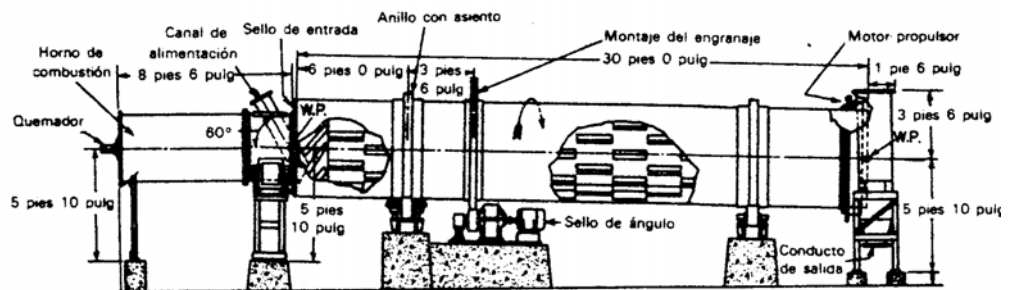


Figura 20-36. Elevación de un secador rotatorio de corriente paralela y calor directo, de 60 pulg de diámetro y 30 pies de largo (CE Raymond/Bartlett-Snow Co.).

Se decidió fabricar el secador de calor directo, flujo de corriente paralela porque:

- Los gases de combustión no afectan al material a secar.
- Es adecuado para materiales pegajosos.
- Nos permite utilizar temperatura del gas más elevada.
- Puede secar grandes cantidades de material.

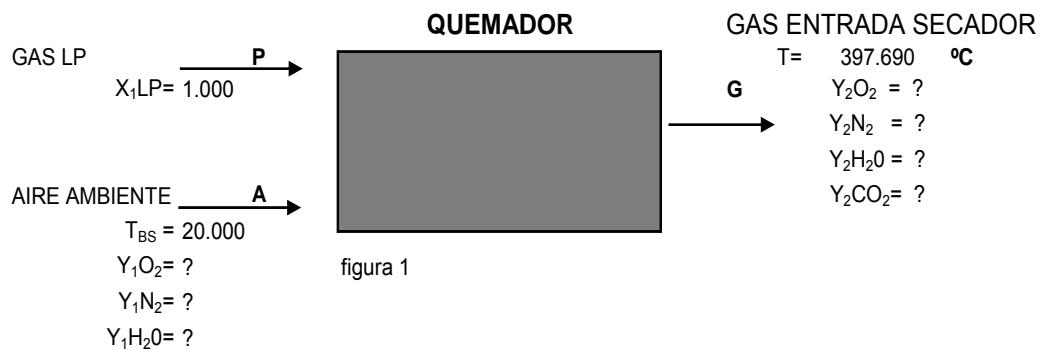
- Es continuo
- Mano de obra baja
- Fácil manejo
- Se podría separar las impurezas del material (piedras) con una malla.

5. CÁLCULOS PARA EL DISEÑO DEL SECADOR

5.1. CÁLCULO DEL GAS DE ENTRADA AL SECADOR

Para poder hacer el cálculo del secador es necesario obtener la composición del aire caliente en la entrada del secador, corriente G.

Necesitamos calentar aire del ambiente por medio de un quemador, introduciendo GAS LP, como se ilustra en la figura 1.



TEMPERATURA BULBO SECO T_{BS} EN EL AIRE CORRIENTE A :

$$T_{BS} (T_{BS} \text{ amb}) = 20.0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

TEMPERATURA DE BULBO HÚMEDO T_{BH} EN EL AIRE CORRIENTE A :

$$T_{BH} (T_{BH} \text{ amb}) = 17.0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

PRESIÓN DE VAPOR DEL AGUA A TEMPERATURA DE BULBO HÚMEDO :

$$\text{PRESIÓN DE VAPOR } (P_v) = 14.5329 \text{ mmHg} \quad \text{APÉNDICE A}$$

HUMEDAD EN TEMPERATURA BULBO HÚMEDO :

$$Y_w = P_v / (P_T - P_v) * (P_{M \text{ H}_2\text{O}}) / (P_{M \text{ AIRE}}) \quad (2) \text{ PAG.254}$$

$$Y_w = 0.0162 \text{ Kg de agua /Kg de aire seco}$$

CALOR LATENTE A TEMPERATURA BULBO HÚMEDO :

$$\lambda_W = 587.8206 \text{ Kcal / Kg} \quad \text{APÉNDICE B}$$

CAPACIDAD CALORÍFICA DEL AIRE A T_{BS} :

INTERVALO 298°K A 1500°K

$$C_p = a + bT + cT^2 \quad T \text{ en } ^\circ\text{k}$$

Capacidad calorífica molar promedio⁽³⁾ pag. 63

$$C_{pm} = a + b(t_2 + t_1) / 2 + c(t_2^2 + t_1 t_2 + t_1^2) / 3$$

Cpm del AIRE EN EL AMBIENTE CORRIENTE A

| COMPONENTE | $t_1 \text{ } ^\circ\text{C}$ | $t_{GC} \text{ } ^\circ\text{C}$ | CONSTANTES | | | Cpm Kcal/Kg mol ^o K |
|---------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|------------|------------|-------------|-----------------------------------|
| | | | a | b | c | |
| O ₂ | 0.000 | 20.000 | 6.148 | 3.1020E-03 | -9.2300E-07 | 6.952 |
| N ₂ | 0.000 | 20.000 | 6.524 | 1.2500E-03 | -1.0000E-09 | 6.878 |
| H ₂ O _(g) | 0.000 | 20.000 | 7.256 | 2.2980E-03 | 2.8300E-07 | 7.929 |

(3) Pag.99

$$C_{pA \text{ PROM DEL AIRE SECO DEL AMBIENTE}} = (Y_{1O_2} C_{p1 O_2} + Y_{1N_2} C_{p1 N_2}) / (\text{moles de gas seco} \cdot \text{PM de gas seco})$$

$$C_{pA \text{ PROM DEL AIRE SECO}} \quad C_{p \text{ PROM A}} (C_B) = 0.239 \text{ Kcal/Kg}^\circ\text{K}$$

CAPACIDAD CALORÍFICA DEL AGUA A T_{amb} :

$$C_P \text{ AGUA } (C_A) = 7.929 \text{ Kcal/Kg mol } ^\circ\text{K}$$

HUMEDAD DEL AMBIENTE :

DESPEJANDO "Y" DE LA SIGUIENTE ECUACIÓN :

$$T_{BS} - T_{BH} = (Y_W - Y) * \lambda_W / (C_B + Y * C_A) \quad (2) \text{ Pag. 259}$$

$$\text{HUMEDAD DEL AMBIENTE } Y = 0.0149 \text{ Kg de agua / Kg de aire seco}$$

5.1.1. CÁLCULO DE LA COMPOSICIÓN DEL AIRE EN LA CORRIENTE A:

EL PESO MOLECULAR DEL AIRE SECO:

$$\text{PM AIRE SECO} = \text{PM N}_2 * (0.79) + \text{PM O}_2 * (0.21)$$

$$\text{PM N}_2 = 28.013 \text{ Kg/Kg mol}$$

$$\text{PM O}_2 = 32.000 \text{ Kg/Kg mol}$$

$$\text{PM}_{\text{AIRE SECO}} = 28.851 \text{ Kg/Kg mol}$$

PONEMOS COMO BASE 100 KG DE AIRE SECO.

$$\text{Kgmol DE AIRE SECO} = \frac{100 \text{ Kg DE AIRE SECO}}{\text{PM AIRE SECO}} = 3.466 \quad \text{Kgmol de aire seco}$$

$$\text{Kg de agua} = \text{humedad del aire} * \text{Kg de aire seco}$$

$$\text{Kg de agua} = 1.490 \quad \text{Kg de agua}$$

$$\text{Kgmol de agua} = \text{Kg de agua} / \text{PM de H}_2\text{O}$$

$$\text{Kgmol de agua} = 0.083 \quad \text{Kgmol de agua}$$

$$\text{Kgmol totales} = \text{Kgmol de aire seco} + \text{Kgmol de agua}$$

$$\text{Kgmol totales} = 3.549 \quad \text{Kgmol} \quad \text{EN LA CORRIENTE A}$$

$$\text{FRACCIÓN MOL DE OXÍGENO} \quad Y_{1O_2} = 0.21 * \text{Kgmol de aire seco} / \text{Kgmol totales}$$

$$\text{FRACCIÓN MOL DE NITRÓGENO} \quad Y_{1N_2} = 0.79 * \text{Kgmol de aire seco} / \text{Kgmol totales}$$

$$\text{FRACCIÓN MOL DE AGUA} \quad Y_{1H_2O} = \text{Kgmol de agua} / \text{Kgmol totales}$$

COMPOSICIÓN DEL AIRE CORRIENTE A

| COMPONENTE | FRACCIÓN MOL | PM | Kg |
|-------------|--------------|-------|-----------|
| Y_{1O_2} | 0.205089 | 32.00 | 6.562840 |
| Y_{1N_2} | 0.771524 | 28.01 | 21.610398 |
| Y_{1H_2O} | 0.023387 | 18.02 | 0.421431 |

$$\text{AIRE SECO} = 1 - Y_{1H_2O}$$

$$\text{AIRE SECO} = 0.977 \quad \text{Kgmol de aire seco}$$

$$\text{PESO SECO TOTAL} = \text{Kg}_{Y_{1O_2}} + \text{Kg}_{Y_{1N_2}} + \text{Kg}_{Y_{1CO_2}}$$

$$\text{PESO SECO TOTAL} = 28.173 \quad \text{Kg de aire seco}$$

$$\text{PESO MOLECULAR PROM. DEL AIRE} = \text{Kg de aire seco} / \text{Kgmol de aire seco}$$

$$\text{PESO MOLECULAR PROM. DEL AIRE SECO} = 28.848 \quad \text{Kg/Kgmol}$$

5.1.2. CÁLCULO DE LA COMPOSICIÓN DEL AIRE EN LA CORRIENTE G

Capacidad calorífica de los gases en la corriente G.

INTERVALO 298°K A 1500°K

$$C_p = a + bT + cT^2 \quad T \text{ en } ^\circ\text{K}$$

Capacidad calorífica molar promedio

$$C_{pm} = a + b(t_2 + t_1) / 2 + c(t_2^2 + t_1 t_2 + t_1^2) / 3$$

| COMPONENTE | t ₁ | t ₂ | CONSTANTES | | | C _{pm} |
|--------------------------------|----------------|----------------|------------|------------|-------------|---------------------------|
| | | | a | b | c | Kcal/Kg ^{mol} °K |
| O ₂ | 20.000 | 397.690 | 6.148 | 3.1020E-03 | -9.2300E-07 | 7.417 |
| O _{2C} | 20.000 | 25.000 | 6.148 | 3.1020E-03 | -9.2300E-07 | 6.984 |
| N ₂ | 20.000 | 397.690 | 6.524 | 1.2500E-03 | -1.0000E-09 | 7.126 |
| CO ₂ | 25.000 | 397.690 | 6.214 | 1.0396E-02 | -3.5450E-06 | 10.377 |
| H ₂ O _H | 20.000 | 397.690 | 7.256 | 2.2980E-03 | 2.8300E-07 | 8.432 |
| H ₂ O _F | 25.000 | 397.690 | 7.256 | 2.2980E-03 | 2.8300E-07 | 8.439 |
| C ₃ H ₈ | 20.000 | 25.000 | 2.410 | 5.7195E-02 | -1.7533E-05 | 17.780 |
| C ₄ H ₁₀ | 20.000 | 25.000 | 3.844 | 7.3350E-02 | -2.2655E-05 | 23.541 |

(3) pag. 99

O_{2C} = OXÍGENO CONSUMIDO POR LA COMBUSTIÓN

H₂O_H = AGUA DE LA HUMEDAD DEL AMBIENTE

H₂O_F = AGUA FORMADA POR LA COMBUSTIÓN DEL GAS LP

BASE 1 Kg^{mol} DE GAS LP (P=1):

$$P = 1.000 \quad \text{Kg^{mol}}$$

$$\text{CALOR LATENTE DEL AGUA} = \lambda_{\text{H}_2\text{O A } 25^\circ\text{C}} = 583.000 \quad \text{Kcal/Kg}$$

CALORES DE COMBUSTIÓN:

$$\Delta H_{CP^\circ} = 530,605.00 \quad \text{Kcal/Kg^{mol}} \quad \text{PROPANO}$$

$$\Delta H_{CB^\circ} = 687,982.00 \quad \text{Kcal/Kg^{mol}} \quad \text{BUTANO}$$

(3) pag. 299

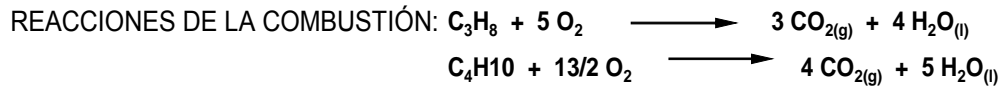
COMPOSICIÓN GAS LP:

| | % VOLUMEN | |
|---------|-----------|---|
| PROPANO | 30.0 | NOTA: ESTE PORCENTAJE VARÍA EN DIFERENTES REGIONES DE MÉXICO |
| BUTANO | 70.0 | |

$$\text{DATO:} \quad C_{p\text{H}_2\text{O}_L} = 1.000 \quad \text{Kcal/Kg}^\circ\text{C}$$

CONSIDERANDO QUE EL AGUA GENERADA POR LA COMBUSTIÓN SE EVAPORA INMEDIATAMENTE.

5.1.3. BALANCE DE MATERIA:



BALANCE DE O_2 :

MOLES DE OXÍGENO CORRIENTE G :

MOLES QUE ENTRAN EN EL AIRE MENOS MOLES QUE REACCIONAN CON EL GAS LP.

$$n_{2O_2} = A * Y_{1O_2} - P * (5\%PROPANO+13/2\%BUTANO)/100$$

$$n_{2O_2} = A \quad 0.20511 \quad -6.050 \quad \dots\dots 1$$

MOLES DE OXÍGENO PARA LA COMBUSTIÓN :

$$n_{0O_2} = P * (5\%PROPANO+13/2\%BUTANO)/100$$

$$n_{0O_2} = 6.050 \quad Kgmol \quad \dots\dots 2$$

BALANCE DE N_2 :

MOLES DE NITRÓGENO EN LA CORRIENTE G :

$$n_{2N_2} = A * Y_{1N_2}$$

$$n_{2N_2} = A \quad 0.77159 \quad \dots\dots 3$$

BALANCE DE CO_2 EN LA CORRIENTE G :

MOLES DE CO_2 EN LA CORRIENTE G PRODUCIDAS POR LA COMBUSTIÓN :

$$n_{2CO_2} = P * (3\%PROPANO+4\%BUTANO)/100$$

$$n_{2CO_2} = 3.700 \quad Kgmol \quad \dots\dots 4$$

BALANCE DE AGUA :

MOLES DE AGUA EN LA ENTRADA CORRIENTE A :

$$n_{1H_2O} = A * Y_{1H_2O}$$

$$n_{1H_2O} = A \quad 0.02331 \quad \dots\dots 5$$

BALANCE DE AGUA FORMADA EN LA COMBUSTIÓN:

$$n_{F\text{H}_2\text{O}_F} = P \cdot (4\% \text{PROPANO} + 5\% \text{BUTANO}) / 100$$

$$n_{F\text{H}_2\text{O}_F} = 4.700 \quad \text{KGMOL de agua formada} \quad \dots\dots 6$$

CALOR DE COMBUSTIÓN DEL GAS LP:

$$\Delta H_{CT^\circ} = (\Delta H_{CP^\circ} \cdot \% \text{PROPANO} + \Delta H_{CB^\circ} \cdot \% \text{BUTANO}) / 100$$

COMO TENEMOS UN Kgmol COMO BASE DE LA MEZCLA DE PROPANO-BUTANO ENTONCES :

CALOR DE COMBUSTIÓN DE LA MEZCLA PROPANO BUTANO

$$\Delta H_{CT^\circ} = 640768.900 \text{ Kcal}$$

5.1.4. BALANCE DE ENERGÍA:

$$\Delta H_{CT^\circ} = n_{2O_2} C_{pmO_2}(t_2-t_1) + n_{2N_2} C_{pmN_2}(t_2-t_1) + n_{2CO_2} C_{pmCO_2}(t_2-25) + n_{FH_2O} C_{pmH_2O}(t_2-25) +$$

$$+ n_{1H_2O} C_{pmH_2O}(t_2-t_1) + n_{FH_2OF} \lambda_{H_2O \text{ a } 25^\circ C} + n_{1C_3H_8} C_{pmC_3H_8}(25-t_1) + n_{1C_4H_{10}} C_{pmC_4H_{10}}(25-t_1)$$

$$+ n_{0O_2} C_{pmO_2c}(25-t_1) \quad \dots\dots\dots 7$$

SUSTITUYENDO LAS ECUACIONES 1, 2, 3, 4, 5 Y 6 EN LA ECUACIÓN 7 Y DESPEJANDO "A":

SE OBTIENE "A" POR UN BALANCE DE MATERIA Y ENERGÍA: $A = 212.412 \text{ Kgmol}$

MOLES DE OXÍGENO CORRIENTE G : $n_{2O_2} = 37.517 \text{ Kgmol}$

MOLES DE NITRÓGENO EN LA CORRIENTE G : $n_{2N_2} = 163.894 \text{ Kgmol}$

MOLES DE CO₂ EN LA CORRIENTE G PRODUCIDAS POR LA COMBUSTIÓN :

$n_{2CO_2} = 3.700 \text{ Kgmol}$

MOLES DE AGUA EN LA CORRIENTE G : $n_{2H_2O} = 9.651 \text{ Kgmol}$

MOLES TOTALES EN LA CORRIENTE G = 214.762 Kgmol

**5.1.5. COMPOSICIÓN EN LA SALIDA DEL QUEMADOR Ó ENTRADA AL SECADOR:
CORRIENTE G**

| COMPONENTE | FRACCIÓN MOL |
|---------------------------------|--------------|
| Y ₂ O ₂ | 0.174690 |
| Y ₂ N ₂ | 0.763144 |
| Y ₂ CO ₂ | 0.017228 |
| Y ₂ H ₂ O | 0.044937 |

$$G_S / \text{Kg mol de gas LP} = G * (Y_{2O_2} + Y_{2N_2} + Y_{2CO_2})$$

GAS SECO / Kg mol gas LP

$$G_S / \text{Kg mol de gas LP} = 205.111 \quad \text{Kgmol de aire seco/Kgmol de gas LP}$$

POR QUE TOMAMOS COMO BASE 1Kgmol de gas LP

5.2. ESTIMACIÓN DEL TAMAÑO DEL SECADOR:

HUMEDAD DEL MATERIAL A LA ENTRADA = 30.0 % BASE HÚMEDA

$$X = \% \text{HUMEDAD} / (100 - \% \text{HUMEDAD})$$

$$X_1 = 0.429 \quad \text{Kg de agua/Kg de sólido seco}$$

HUMEDAD DEL MATERIAL A LA SALIDA = 0.500 % BASE HÚMEDA

$$X_2 = 0.0050 \quad \text{Kg de agua/Kg de sólido seco}$$

PRODUCTO SECO CON LA HUMEDAD DESEADA = 500.000 Kg de producto/h

$$S_S = \text{sólido seco} / 3600 * (1 - X_2)$$

$$S_S = 0.138191 \quad \text{Kg de sólido seco/s}$$

$$\text{AGUA QUE SE VA A EVAPORAR} = S_S * (X_1 - X_2)$$

$$\text{AGUA QUE SE VA A EVAPORAR} = 0.059 \quad \text{Kg de agua/s}$$

BASE 1 Kgmol DE AIRE ENTRANTE PARA CALCULAR Y₁.

| COMPONENTE | Kgmol | Kg/Kgmol | Kg |
|------------------------------|----------|----------|--------|
| Y _{1O₂} | 0.174690 | 32.000 | 5.590 |
| Y _{1N₂} | 0.763144 | 28.013 | 21.378 |
| Y _{1CO₂} | 0.017228 | 44.000 | 0.758 |
| Y _{1H₂O} | 0.044937 | 18.020 | 0.810 |

$$\text{AIRE SECO} = 1 - Y_1 H_2O$$

$$\text{AIRE SECO} = 0.955 \quad \text{Kgmol de aire seco}$$

$$\text{PESO SECO TOTAL} = \text{Kg}Y_1O_2 + \text{Kg}Y_1N_2 + \text{Kg}Y_1CO_2$$

$$\text{PESO SECO TOTAL} = 27.726 \quad \text{Kg de aire seco}$$

$$\text{PESO MOLECULAR PROM. DEL AIRE} = \text{Kg de aire seco/Kgmol de aire seco}$$

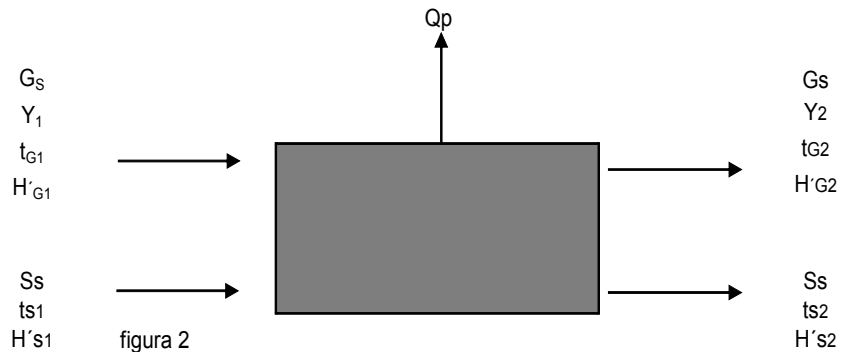
$$\text{PESO MOLECULAR PROM. DEL AIRE SECO} = 29.032 \quad \text{Kg/Kgmol} \quad \text{ES MUY SEMEJANTE AL AIRE.}$$

$Y_1 = \text{Kg de agua/Kg de aire seco}$ EN LA ENTRADA AL SECADOR

$$Y_1 = 0.0292 \quad \text{Kg de agua/Kg de aire seco}$$

5.2.1. BALANCE DE MATERIA

En la figura 2 se muestra un diagrama de flujo para un secador continuo, arreglo para flujo paralelo. El sólido entra con un flujo S_s (masa sólido seco / tiempo); se seca de X_1 a X_2 (masa humedad / masa sólido seco) y sufre el sólido un cambio de temperatura de ts_1 a ts_2 . El gas G_s (masa gas seco / tiempo) fluye del punto 1 al 2 y sufre un cambio de humedad de Y_1 a Y_2 y un cambio de temperatura tG_1 a tG_2 .



BALANCE DE HUMEDAD

(2) pag 773

$$S_s X_1 + G_s Y_1 = S_s X_2 + G_s Y_2$$

$$S_s (X_1 - X_2) = G_s (Y_2 - Y_1)$$

5.2.2. BALANCE DE ENTALPÍA

$$S_S H_{S1} + G_S H_{G1} = S_S H_{S2} + G_S H_{G2} + Q_p \quad (2) \text{ Pag. 774}$$

T_{G1} = ES LA TEMPERATURA DE SALIDA DEL QUEMADOR Ó
TEMPERATURA ENTRADA AL SECADOR.

t_1 = TEMPERATURA DE REFERENCIA

$$T_{G1} = 397.690 \quad ^\circ\text{C} \quad \text{Temperatura entrada al secador}$$

Cpm del AIRE en la entrada

| COMPONENTE | $t_1 \quad ^\circ\text{C}$ | $t_{G1} \quad ^\circ\text{C}$ | CONSTANTES | | | Cpm Kcal/Kg mol ^o K |
|------------------|----------------------------|-------------------------------|------------|------------|-------------|-----------------------------------|
| | | | a | b | c | |
| O ₂ | 0.000 | 397.690 | 6.148 | 3.1020E-03 | -9.2300E-07 | 7.394 |
| N ₂ | 0.000 | 397.690 | 6.524 | 1.2500E-03 | -1.0000E-09 | 7.114 |
| CO ₂ | 0.000 | 397.690 | 6.214 | 1.0396E-02 | -3.5450E-06 | 10.283 |
| H ₂ O | 0.000 | 397.690 | 7.256 | 2.2980E-03 | 2.8300E-07 | 8.407 |

$$C_{p1 \text{ PROM DEL AIRE SECO EN LA ENTRADA}} = (Y_{1O_2} C_{pm1 O_2} + Y_{1N_2} C_{pm1 N_2} + Y_{1CO_2} C_{pm1 CO_2}) / (\text{moles de gas seco} \cdot \text{PM de gas seco})$$

$$C_{p1 \text{ PROM DEL AIRE SECO EN LA ENTRADA}} C_{p \text{ PROMAE}} = 0.249 \quad \text{Kcal / Kg DE GAS SECO} \cdot ^\circ\text{K}$$

$$\text{CALOR LATENTE AGUA } \lambda^o = 597.200 \quad \text{Kcal/Kg a } 0^\circ\text{C}$$

(3) pag. 93

5.2.2.1. ENTALPÍA DEL GAS Ó AIRE EN LA ENTRADA AL SECADOR:

$$H_{G1} = (C_{p \text{ PROMAE}} + Y_1 \cdot C_{pm_{H_2O/PM_{H_2O}}}) (T_{G1} - t_1) + \lambda^o_{H_2O} Y_1$$

$$H_{G1} = 121.794 \quad \text{Kcal/Kg de gas seco}$$

$$\text{TEMPERATURA DEL AIRE DE SALIDA SE TOMARÁ } (T_{G2}) = 65.000 \quad ^\circ\text{C}$$

Cpm del aire en la salida

| COMPONENTE | $t_1 \quad ^\circ\text{C}$ | $t_{G2} \quad ^\circ\text{C}$ | CONSTANTES | | | Cpm Kcal/Kg mol ^o K |
|------------------|----------------------------|-------------------------------|------------|------------|-------------|-----------------------------------|
| | | | a | b | c | |
| O ₂ | 0.000 | 65.000 | 6.148 | 3.1020E-03 | -9.2300E-07 | 7.009 |
| N ₂ | 0.000 | 65.000 | 6.524 | 1.2500E-03 | -1.0000E-09 | 6.906 |
| CO ₂ | 0.000 | 65.000 | 6.214 | 1.0396E-02 | -3.5450E-06 | 9.058 |
| H ₂ O | 0.000 | 65.000 | 7.256 | 2.2980E-03 | 2.8300E-07 | 7.985 |

$$C_p \text{ PROM DEL AIRE SECO DE SALIDA} = (Y_{1O_2} C_{pM_{O_2}} + Y_{1N_2} C_{pM_{N_2}} + Y_{1CO_2} C_{pM_{CO_2}}) / (\text{moles de gas seco} * PM \text{ de gas seco})$$

$$C_p \text{ promedio del AIRE de salida } C_{pPROMAS} = 0.23987 \text{ Kcal / Kg DE AIRE SECO } ^\circ K$$

5.2.2.2. ENTALPÍA DEL GAS Ó AIRE EN LA SALIDA DEL SECADOR:

$$H_{G2} = (C_{pPROMAS} + C_{pM_{H_2O}}/PM_{H_2O} Y_2) (T_{G2} - 0) + \lambda_{H_2O} Y_2$$

DEJANDO H_{G2} EN FUNSIÓN DE Y_2 :

$$H_{G2} = 626.001 Y_2 + 15.591$$

CONSIDERANDO CALOR INTEGRAL DE HUMIDIFICACIÓN: $\Delta H_A = 0$

5.2.2.3. ENTALPÍA DEL SÓLIDO EN LA ENTRADA AL SECADOR:

ENTALPÍA DEL SÓLIDO HÚMEDO

$$H's = C_s(ts - t_o) + XCa(ts - t_o) + \Delta H_A \quad (2) \text{ pag.675}$$

$H's$ = entalpía del sólido húmedo en t_s , respecto al sólido y líquido a la temperatura de referencia t_o , energía / masa sólido seco.

C_s = Capacidad calorífica del sólido seco, energía / masa (temp)

Ca = capacidad calorífica de la humedad, como un líquido, energía / masa(temp)

ΔH_A = calor integral de humidificación con referencia al líquido y sólidos puros en t_o .

$$C_p H_2O_L = 1.000 \text{ Kcal/Kg}^\circ C$$

$$\text{TEMPERATURA DEL SÓLIDO EN LA ENTRADA} = 18.000 \text{ } ^\circ C$$

$$\text{TEMPERATURA SALIDA SÓLIDO} = 59.440 \text{ } ^\circ C$$

$$C_p \text{ del SÓLIDO} = a + b t + c t^2$$

| COMPONENTE | $t_o=t_1$ °C | $t_{s1}=t_2$ °C | CONSTANTES | | | Cpms |
|---------------------------------------|--------------|-----------------|------------|------------|-------------|-----------------------|
| | | | a | b | c | Kcal/Kg $mol^\circ K$ |
| Fe ₂ O ₃ =Cpms1 | 0.000 | 18.000 | 24.720 | 1.6040E-02 | -4.2340E+05 | 23.927 |
| Fe ₂ O ₃ =Cpms2 | 0.000 | 59.440 | 24.720 | 1.6040E-02 | -4.2340E+05 | 24.914 |

(3) pag. 103

$$H_{s1} = C_{pms1} (t_{s1} - t_o) + X_1 C_{pH_2O_L} (t_{s1} - t_o) + \Delta H_A$$

$$H_{s1} = 10.440 \text{ Kcal/Kg de sólido seco}$$

5.2.2.4. ENTALPÍA DEL SÓLIDO EN LA SALIDA DEL SECADOR:

$$H_{s2} = C_{pms2} (t_{s2} - t_o) + X_2 C_{pH_2O_L} (t_{s2} - t_o) + \Delta H_A$$

$$H_{s2} = 9.672 \text{ Kcal/Kg de sólido seco}$$

5.2.3. PÉRDIDA DE CALOR EN EL TUBO:

SUPONIENDO UN DIÁMETRO DE SECADOR = 1.040 m
 ÁREA TRANSVERSAL DE SECADOR = 0.849 m²
 SUPONIENDO LA LONGITUD DEL SECADOR DE = 9.481 m
 ESPESOR DE AISLANTE LANA MINERAL Eais = 0.000 in

TEMPERATURA PROMEDIO DEL AIRE A LO LARGO DEL CUERPO DEL SECADOR $T = (T_{G1} - T_{amb}) + (T_{G2} - T_{amb}) / 2$

$$T = 211.345 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T = 211.345 \text{ } ^\circ\text{C} \longrightarrow T = 412.421 \text{ } ^\circ\text{F}$$

$$t_{amb} = 20.000 \text{ } ^\circ\text{C} \longrightarrow t_{amb} = 68.000 \text{ } ^\circ\text{F}$$

CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE LANA MINERAL Kc = 0.0330 BTU/h ft² °F/ft
 (5)

$$\text{DIÁMETRO DEL SECADOR } D_s = 1.040 \text{ m} \longrightarrow D_s = 40.945 \text{ in}$$

$$\text{PERÍMETRO} = 3.267 \text{ m}$$

$$\text{ÁREA POR PÉRDIDA DE CALOR} = 30.977 \text{ m}^2$$

SUPONEMOS UNA TEMPERATURA tsp (temperatura de superficie de la pared cilindro)

$$t_{sp} = 412.421 \text{ } ^\circ\text{F SUPUESTA} \quad 211.345 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_{sp} = t_{sp} - T_{amb} \quad T_{amb} = \text{temperatura ambiente}$$

$$\Delta t_{sp} = 344.421 \text{ } ^\circ\text{F}$$

CON ESTA ΔT_{sp} ENTRAMOS A LA GRÁFICA Y OBTENEMOS EL COEFICIENTE COMBINADO

DE CONVECCIÓN Y RADIACIÓN ha :

APÉNDICE C

$$h_a = 3.303 \text{ BTU/h ft}^2 \text{ } ^\circ\text{F}$$

DESPUES CALCULAMOS EL CALOR PERDIDO (5) pag 35

$$Q = 3.1416 * (T - T_{amb}) / (2.3 / (2 * k_c) * \text{LOG}((D_s + 2 * E_{ais}) / D_s) + 1 / (h_a * (D_s + 2 * E_{ais})))$$

$$Q = 12193.677 \text{ BTU/(h ft)} \quad 12196.677$$

CON EL CALOR PERDIDO CALCULADO SE CALCULA LA TEMPERATURA DE LA SUPERFICIE DEL CILINDRO

$$t_{sp\text{CALCULADO}} = (Q * (2.3 * \text{LOG}(D_s + 2 * E_{ais})) - (2 * 3.1416 * k_c * T)) / (2 * 3.1416 * k_c)$$

$$t_{sp\text{CALCULADO}} = 412.421 \text{ } ^\circ\text{F} \longrightarrow t_{sp\text{CALCULADO}} = 211.345 \text{ } ^\circ\text{C}$$

CUANDO tsp SEA IGUAL A tspCALCULADA SE OBTIENE EL CALOR PERDIDO POR EL CUERPO DEL SECADOR.

PÉRDIDA POR EL CUERPO DEL SECADOR $Q_p = 379276 \text{ BTU/h}$

$Q_p = 95578 \text{ Kcal/h}$ $Q_p = 26.549 \text{ Kcal/s}$

BALANCE DE MATERIA Y ENERGÍA EN EL SECADOR:

$$S_s (X_1 - X_2) = G_s (Y_2 - Y_1) \quad S_s (X_1 - X_2) = \text{AGUA EVAPORADA}$$

$$G_s = \text{AGUA EVAPORADA} / (Y_2 - Y_1) \dots\dots\dots 1$$

$$S_s H_{S1} + G_s H_{G1} = S_s H_{S2} + G_s H_{G2} + Q_p \dots\dots\dots 2$$

SUSTITUYENDO Y RESOLVIENDO SIMULTANEAMENTE 1 Y 2 SE OBTIENE G_s :

$$G_s = 0.7175 \text{ Kg DE AIRE SECO/S}$$

$$G_s = 0.0247 \text{ Kgmol DE AIRE SECO/S}$$

$$Y_2 = 0.1108 \text{ Kg de agua/Kg de aire seco}$$

$$H_{G2} = 84.9396 \text{ Kcal/Kg de gas seco}$$

COMPOSICIÓN DEL AIRE SECO EN LA ENTRADA Y SALIDA AL SECADOR

| COMPONENTE | MOLES ENTRADA | FRACCIÓN MOL | % |
|-------------|---------------|--------------|---------|
| Y_{1O_2} | 0.174690 | 0.1829 | 18.2910 |
| Y_{1N_2} | 0.763144 | 0.7991 | 79.9052 |
| Y_{1CO_2} | 0.017228 | 0.0180 | 1.8039 |

BASE 1 MOL DE AIRE ENTRANTE

5.2.4. COMPOSICIÓN DEL AIRE EN LA ENTRADA

| COMPONENTE | Kgmol | PM | KG | FRACCIÓN MOL |
|-------------|----------|-----------|----------|--------------|
| Y_{1O_2} | 0.004518 | 32.000000 | 0.144572 | 0.174685 |
| Y_{1N_2} | 0.019737 | 28.000000 | 0.552624 | 0.763120 |
| Y_{1CO_2} | 0.000446 | 44.000000 | 0.019604 | 0.017227 |
| Y_{1H_2O} | 0.001163 | 18.020000 | 0.020957 | 0.044968 |

$$\text{AIRE SECO} = 1 - Y_{1H_2O}$$

$$\text{AIRE SECO} = 0.955032 \text{ Kgmol DE AIRE SECO}$$

$$PM = 29.020 \text{ Kg / Kgmol DE AIRE SECO}$$

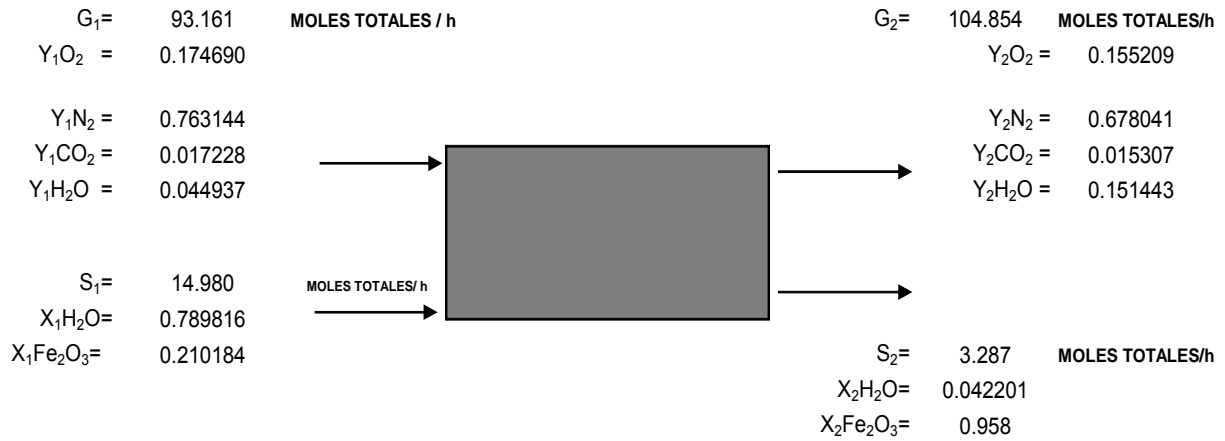
5.2.5. COMPOSICIÓN DEL AIRE EN LA SALIDA

| COMPONENTE | Kgmol | PM | Kg | FRACCIÓN MOL |
|-------------|----------|-----------|----------|--------------|
| Y_{2O_2} | 0.004518 | 32.000000 | 0.144572 | 0.155191 |
| Y_{2N_2} | 0.019737 | 28.000000 | 0.552624 | 0.677960 |
| Y_{2CO_2} | 0.000446 | 44.000000 | 0.019604 | 0.015305 |
| Y_{2H_2O} | 0.004412 | 18.020000 | 0.079499 | 0.151544 |

$$\text{AIRE SECO} = 0.848456 \text{ Kgmol DE AIRE SECO}$$

$$PM = 29.020 \text{ Kg / Kgmol DE AIRE SECO}$$

5.2.6. COMPROBACIÓN DE BALANCE DE MATERIA :



BALANCE GENERAL:

$$G_1 + S_1 = G_2 + S_2$$

ENTRADA $G_1 + S_1 = 108.141$ Kgmol / h

SALIDA $G_2 + S_2 = 108.141$ Kgmol / h

BALANCE DE AGUA:

$$G_1 * Y_1H_2O + S_1 * X_1H_2O = G_2 * Y_2H_2O + S_2 * X_2H_2O$$

ENTRADA $G_1 * Y_1H_2O + S_1 * X_1H_2O = 16.018$ Kgmol DE AGUA / h

SALIDA $G_2 * Y_2H_2O + S_2 * X_2H_2O = 16.018$ Kgmol DE AGUA / h

BALANCE DEL O₂ :

$$G_1 * Y_1O_2 = G_2 * Y_2O_2$$

ENTRADA $G_1 * Y_1O_2 = 16.2743$ Kgmol DE O₂ / h

SALIDA $G_2 * Y_2O_2 = 16.2743$ Kgmol DE O₂ / h

BALANCE DEL N₂ :

$$G_1 * Y_1N_2 = G_2 * Y_2N_2$$

ENTRADA $G_1 * Y_1N_2 = 71.0953$ Kgmol DE N₂ / h

SALIDA $G_2 * Y_2N_2 = 71.0953$ Kgmol DE N₂ / h

BALANCE DEL CO₂ :

$$G_1 * Y_{1CO_2} = G_2 * Y_{2N_2}$$

ENTRADA $G_1 * Y_{1CO_2} = 1.6050$ Kgmol DE CO₂ / h

SALIDA $G_2 * Y_{2N_2} = 1.6050$ Kgmol DE CO₂ / h

BALANCE DEL Fe₂O₃ :

$$S_1 * X_{1Fe_2O_3} = S_2 * X_{2Fe_2O_3}$$

ENTRADA $S_1 * X_{1Fe_2O_3} = 3.1487$ Kgmol DE Fe₂O₃ / h

SALIDA $S_2 * X_{2Fe_2O_3} = 3.1487$ Kgmol DE Fe₂O₃ / h

5.2.7. CÁLCULO DE LA TEMPERATURA DE BULBO HÚMEDO DEL GAS :

TEMPERATURA DE BULBO HÚMEDO EN EL PUNTO 1 (T_{G1}):

Temperatura del aire entrada (T_{G1}) = 397.7 °C

T_{BH1} calculada: 57.49 °C

PRESIÓN DE VAPOR DEL AGUA A TEMPERATURA DE BULBO HÚMEDO:

presión de vapor= 132.87 mmHg

HUMEDAD EN TEMPERATURA BULBO HÚMEDO

$$Y_W = P_v / (P_T - P_v) * (P_M H_2O) / (P_M AIRE)$$

Y_W = 0.1874 Kg de agua / Kg de aire seco

CALOR LATENTE A LA T_{BH1} :

$\lambda_W = 564.6313$ KCAL / Kg a T_{BH1} APÉNDICE B

HUMEDAD DEL AIRE EN LA ENTRADA AL SECADOR:

Y₁= 0.0292 Kg de agua / Kg de aire seco

$$T_{G1}-T_{BH1} = \lambda_W (Y_W - Y_1) / CH_1$$

$$T_{G1}-T_{BH1} = 340.2 \quad 340.20 = \lambda_W (Y_W - Y_1) / CH_1$$

INCREMENTO T_{BH1} CALCULADA

$$(T_{G1}-T_{BH1}) - \lambda_W (Y_W - Y_1) / CH_1 = 0 \quad \text{NOTA: Con este incremento regresa a calcular } T_{BH1}$$

TEMPERATURA DE BULBO HÚMEDO EN EL PUNTO C (T_{GC}):

$$T_{GC} = 374.4 \quad ^\circ\text{C}$$

$$T_{BHA} = T_{BHC} \text{ calculada} = 56.51 \quad ^\circ\text{C}$$

PRESIÓN DE VAPOR DEL AGUA A TEMPERATURA DE BULBO HÚMEDO:

$$\text{presión de vapor} = 126.87 \quad \text{mmHg}$$

HUMEDAD EN TEMPERATURA BULBO HÚMEDO

$$Y_W = P_v / (P_T - P_v) (P_{M \text{ H}_2\text{O}}) / (P_{M \text{ AIRE}})$$

$$Y_W = 0.1765 \quad \text{Kg de agua / Kg de aire seco}$$

CALOR LATENTE A LA T_{BHC} :

$$\lambda_W = 565.21 \quad \text{KCAL / Kg} \quad \text{A } T_{BHC} \quad \text{APÉNDICE B}$$

$$\lambda_W = 2366.41 \quad \text{KJ / Kg}$$

HUMEDAD DEL AIRE EN LA ENTRADA AL SECADOR:

$$Y_1 = Y_C = 0.0292 \quad \text{Kg de agua / Kg de aire seco}$$

Cpm del AIRE EN EL PUNTO C

| COMPONENTE | $t_1 \quad ^\circ\text{C}$ | $t_{ec} \quad ^\circ\text{C}$ | CONSTANTES | | | Cpm Kcal/Kg $^{\circ}$ mol $^{\circ}$ K |
|------------------|----------------------------|-------------------------------|------------|------------|-------------|--|
| | | | a | b | c | |
| O ₂ | 0.000 | 374.400 | 6.148 | 3.1020E-03 | -9.2300E-07 | 7.369 |
| N ₂ | 0.000 | 374.400 | 6.524 | 1.2500E-03 | -1.0000E-09 | 7.099 |
| CO ₂ | 0.000 | 374.400 | 6.214 | 1.0396E-02 | -3.5450E-06 | 10.206 |
| H ₂ O | 0.000 | 374.400 | 7.256 | 2.2980E-03 | 2.8300E-07 | 8.377 |

$$C_{p\text{PROM DEL AIRE SECO EN EL PUNTO C}} = (Y_{1O_2} C_{pm1 O_2} + Y_{1N_2} C_{pm1 N_2} + Y_{1CO_2} C_{pm1 CO_2}) / (\text{moles de gas seco} * PM \text{ de gas seco})$$

$$C_{p\text{C PROM DEL AIRE SECO EN EL PUNTO C}} = C_{p\text{PROMAC}} = 0.248 \text{ Kcal/Kg}^\circ\text{K}$$

$$\text{CALOR HÚMEDO } CH_C = C_{p\text{PROMAC}} + Y_C * C_{pm H_2O}$$

$$\text{CALOR HÚMEDO } CH_C = 0.262 \text{ Kcal/Kg de gas seco}^\circ\text{K}$$

$$T_{GC} - T_{BHC} = \lambda_W (Y_W - Y_C) / CH_C$$

$$T_{GC} - T_{BHC} = 317.93 - 317.93 = \lambda_W (Y_W - Y_C) / CH_C$$

INCREMENTO T_{BHC} CALCULADA

$$(T_{GC} - T_{BHC}) - \lambda_W (Y_W - Y_C) / CH_C = 0 \quad \text{NOTA: Con este incremento regresa a calcular } T_{BHC}$$

TEMPERATURA DE BULBO HÚMEDO EN EL PUNTO D (TGD):

$$T_{GD} = 67.5 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{BHD} \text{ calculada} = 50.02 \text{ }^\circ\text{C}$$

PRESIÓN DE VAPOR DEL AGUA A TEMPERATURA DE BULBO HÚMEDO:

$$\text{presión de vapor} = 92.60 \text{ mmHg}$$

HUMEDAD EN TEMPERATURA BULBO HÚMEDO

$$Y_W = P_v / (P_T - P_v) (PM H_2O) / (PM AIRE)$$

$$Y_W = 0.1197 \text{ Kg de agua /Kg de aire seco}$$

CALOR LATENTE A LA T_{BHG} :

$$\lambda_W = 569.00 \text{ KCAL/Kg} \quad \text{A } T_{BHG} \quad \text{APÉNDICE B}$$

$$\lambda_W = 2382.29 \text{ KJ/Kg}$$

HUMEDAD DEL AIRE EN LA ENTRADA AL SECADOR:

$$Y_D = Y_2 = 0.1108 \text{ Kg de agua/Kg de aire seco}$$

Cpm del AIRE EN EN EL PUNTO D

| COMPONENTE | t ₁ °C | t _{GD} °C | CONSTANTES | | | Cpm Kcal/KgmoI°K |
|------------------|-------------------|--------------------|------------|------------|-------------|---------------------|
| | | | a | b | c | |
| O ₂ | 0.000 | 67.537 | 6.148 | 3.1020E-03 | -9.2300E-07 | 7.012 |
| N ₂ | 0.000 | 67.537 | 6.524 | 1.2500E-03 | -1.0000E-09 | 6.907 |
| CO ₂ | 0.000 | 67.537 | 6.214 | 1.0396E-02 | -3.5450E-06 | 9.068 |
| H ₂ O | 0.000 | 67.537 | 7.256 | 2.2980E-03 | 2.8300E-07 | 7.988 |

$$C_{pD} \text{ PROM DEL AIRE SECO EN EL PUNTO C} = (Y_{1O_2} C_{pm1 O_2} + Y_{1N_2} C_{pm1 N_2} + Y_{1CO_2} C_{pm1 CO_2}) / (\text{moles de gas seco} \cdot PM \text{ de gas seco})$$

$$C_{pD} \text{ PROM DEL AIRE SECO EN EL PUNTO C} = C_{pPROMAD} = 0.240 \text{ Kcal/Kg}^\circ\text{K}$$

$$\text{CALOR HÚMEDO } CH_D = C_{pPROMAD} + Y_D \cdot C_{PM H_2O}$$

$$\text{CALOR HÚMEDO } CH_D = 0.289 \text{ Kcal/Kg de gas seco}^\circ\text{K}$$

$$T_{GD} - T_{BHD} = \lambda_W (Y_W - Y_2) / CH_D$$

$$T_{GD} - T_{BHD} = 17.51 \quad 17.51 = \lambda_W (Y_W - Y_2) / CH_D$$

INCREMENTO T_{BHD} CALCULADA

$$(T_{GD} - T_{BHD}) - \lambda_W (Y_W - Y_2) / CH_D = 0 \text{ NOTA: Con este incremento regresa a calcular TBHD}$$

TEMPERATURA DE BULBO HÚMEDO EN EL PUNTO 2 (T_{G2}):

$$TG2 = 65.0 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$TBH2 \text{ calculada} = 49.85285025 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\text{presión de vapor} = 91.83355284 \text{ mmHg}$$

HUMEDAD EN TEMPERATURA BULBO HÚMEDO:

$$Y_W = P_v / (P_T - P_v) (PM H_2O) / (PM AIRE)$$

$$Y_W = 0.1185 \text{ Kg de agua /Kg de aire seco}$$

CALOR LATENTE A LA T_{BH2}:

$$\lambda_W = 569.0966 \text{ Kcal/Kg} \quad \text{A } T_{BH2} \text{ APÉNDICE B}$$

HUMEDAD DEL AIRE EN LA ENTRADA AL SECADOR:

$$Y_2 = 0.1108 \text{ Kg de agua/Kg de aire seco}$$

$$T_{G2} - T_{BH2} = \lambda_W (Y_W - Y_2) / CH_D$$

$$T_{G2} - T_{BH2} = 15.15 \quad 15.15 = \lambda_W (Y_W - Y_2) / CH_2$$

INCREMENTO T_{BH2} CALCULADA

$$(T_{G2} - T_{BH2}) - \lambda_W (Y_W - Y_2) / CH_2 = 0 \quad \text{NOTA: Con este incremento regresa a calcular } T_{BH2}$$

LA ENTALPÍA DEL SÓLIDO EN EL PUNTO A:

$$C_p \text{ del SÓLIDO} = a + b t + c / t^2$$

| COMPONENTE | t_1 | T_{BHA} | CONSTANTES | | | C_{psBH} |
|------------|-------|-----------|------------|------------|-------------|----------------|
| | | | a | b | c | Kcal/Kg mol °C |
| Fe_2O_3 | 0.000 | 56.512 | 24.720 | 1.6040E-02 | -4.2340E+05 | 24.850 |

SUPONIENDO QUE TODA LA HUMEDAD SE EVAPORA EN LA ZONA II Y A TEMPERATURA DE BULBO HÚMEDO,

$$T_{BHA} = 56.512 \quad ^\circ C \quad \text{y} \quad X_1 = 0.429 \quad \text{Kg de agua/Kg de sólido seco (PUNTO A)}$$

$$H_{SA} = C_{psBH} (t_{BHA} - t_1) + X_1 C_{pH_2O} (t_{BHA} - t_1) + H_A$$

$$H_{SA} = 33.108 \quad \text{Kcal/Kg de sólido seco}$$

LA ENTALPÍA DEL SÓLIDO EN EL PUNTO B:

$$C_p \text{ del SÓLIDO} = a + b t + c / t^2$$

| COMPONENTE | t_1 | T_{BHB} | CONSTANTES | | | C_{psBH} |
|------------|-------|-----------|------------|------------|-------------|----------------|
| | | | a | b | c | Kcal/Kg mol °C |
| Fe_2O_3 | 0.000 | 50.025 | 24.720 | 1.6040E-02 | -4.2340E+05 | 24.704 |

$$T_{BHB} = 50.025 \quad ^\circ C \quad \text{y} \quad X_2 = 0.005 \quad \text{Kg agua/Kg de sólido seco}$$

$$H_{SB} = C_{psBH} (t_{BHB} - t_1) + X_2 C_{pH_2O} (t_{BHB} - t_1) + H_A$$

$$H_{SB} = 8.073 \quad \text{Kcal/Kg de sólido seco}$$

5.2.8. CÁLCULO DEL PORCENTAJE DE PÉRDIDA DE CALOR EN CADA ZONA

La longitud o distancia del secador se divide en tres zonas, la ZONA I corresponde a la longitud necesaria para calentar el material a la temperatura de bulbo húmedo sin secado, la ZONA II corresponde a la longitud necesaria para secar el material y la ZONA III corresponde a la longitud necesaria para calentar el material de la temperatura de bulbo húmedo a la temperatura de salida del material.

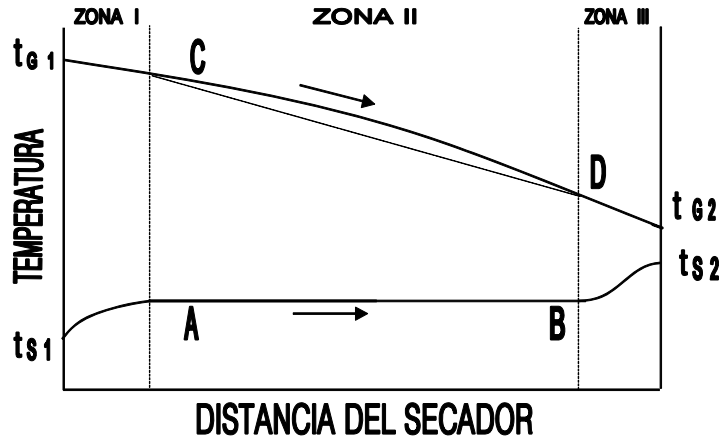
Suponiendo que las pérdidas de calor en las tres zonas son proporcionales al número de unidades de transferencia en cada zona y a la diferencia de temperatura promedio entre el gas y el aire que lo rodea:
(2)

| | | % TEMP | NTOG* %T | % DE PÉRDIDA |
|-------------------------------------|---|--------------------------|----------|--------------|
| ZONA I | $t_{G1}-t_{amb} = 377.690$ $t_{GC}-t_{amb} = 354.443$ $(t_{G1}-t_{amb}) + (t_{GC}-t_{amb}) / 2 = 366.067$ | 0.597 | 0.015 | 0.0469323 |
| ZONA II | $t_{GC}-t_{amb} = 354.443$ $t_{GD}-t_{amb} = 47.537$ $(t_{GC}-t_{amb}) + (t_{GD}-t_{amb}) / 2 = 200.990$ | 0.328 | 0.303 | 0.9415757 |
| ZONA III | $t_{GD}-t_{amb} = 47.537$ $t_{G2}-t_{amb} = 45.000$ $((t_{GD}-t_{amb}) + (t_{G2}-t_{amb})) / 2 = 46.269$ | 0.075 | 0.004 | 0.0114920 |
| SUMATORIA DE TEMPERATURAS = 613.325 | | SUMATORIA NTOG*%T= 0.322 | | |

% DE PÉRDIDA DE CALOR

| | |
|----------|-----------|
| ZONA I | 0.0469323 |
| ZONA II | 0.9415757 |
| ZONA III | 0.0114920 |

Gradientes de temperatura en un secador a corriente paralela:



5.2.9. CÁLCULO ZONA I :

LA ZONA I SE VA A TOMAR COMO PRECALENTAMIENTO DEL SÓLIDO SIN SECADO.

t_1 = TEMPERATURA DE REFERENCIA

Cpm del AIRE en la entrada

| COMPONENTE | t_1 °C | t_{g1} °C | CONSTANTES | | | Cpm Kcal/Kgmo!°K |
|------------------|----------|-------------|------------|------------|-------------|---------------------|
| | | | a | b | c | |
| O ₂ | 0.000 | 397.690 | 6.148 | 3.1020E-03 | -9.2300E-07 | 7.394 |
| N ₂ | 0.000 | 397.690 | 6.524 | 1.2500E-03 | -1.0000E-09 | 7.114 |
| CO ₂ | 0.000 | 397.690 | 6.214 | 1.0396E-02 | -3.5450E-06 | 10.283 |
| H ₂ O | 0.000 | 397.690 | 7.256 | 2.2980E-03 | 2.8300E-07 | 8.407 |

$$C_{p1} \text{ PROM DEL AIRE SECO EN LA ENTRADA} = (Y_{1O_2} C_{pm1 O_2} + Y_{1N_2} C_{pm1 N_2} + Y_{1CO_2} C_{pm1 CO_2}) / (\text{moles de gas seco} \cdot \text{PM de gas seco})$$

$$C_{p1} \text{ PROM DEL AIRE SECO EN LA ENTRADA } C_{ppromae} = 0.249 \quad \text{Kcal/Kg}^\circ\text{K}$$

$$\text{CALOR HÚMEDO } CH_1 = 0.263 \quad \text{Kcal/Kg de gas seco}^\circ\text{K}$$

$$G_S CH_1 (T_{G1} - T_{GC}) = S_S (H_{SA} - H_{S1}) + \text{ZONA I } Q_p$$

T_{G1}-T_{GC} ES LA TEMPERATURA QUE BAJA EL AIRE PARA CALENTAR EL SÓLIDO A T_{BHA} Y PARA EL CALOR PERDIDO:

DESPEJANDO T_{GC}:

$$T_{GC} = 374.443 \quad ^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_G \text{ PARA CALENTAR EL SÓLIDO A } T_{BHA} = S_S (H_{SA} - H_{S1}) / (G_S CH_1)$$

$$\Delta T_G = 16.631 \quad ^\circ\text{C}$$

$$\text{DIFERENCIA DE TEMP. PROMEDIO ENTRE EL GAS Y EL SÓLIDO ES} = ((T_{G1} - T_{S1}) + (T_{GC} - T_{BHA})) / 2$$

$$\text{DIFERENCIA DE TEMP. PROMEDIO ENTRE EL GAS Y EL SÓLIDO ES} = 348.810 \quad ^\circ\text{C} = \Delta t_m$$

$$\text{NÚMERO DE UNIDADES DE TRANSFERENCIA DE CALOR} = N_{tOG} = \Delta t_g / \Delta t_m$$

$$N_{tOG} = 0.048 \quad (2) \text{ pag. 777-778}$$

5.2.10. CÁLCULO ZONA III :

$$CH_2 = C_{pPROMGS} + C_{pm2} H_2O Y_2$$

$$CH_2 = 0.289 \quad \text{Kcal/Kg de sólido seco}^\circ\text{K}$$

$$G_S (CH_2) (T_{G2} - T_{GD}) = S_S (H_{S2} - H_{SB}) + \text{ZONA III } Q_p$$

DESPEJANDO T_{GD} :

$$T_{GD} = 67.537 \quad ^\circ\text{C}$$

$$\Delta TG \text{ PARA CALENTAR EL SÓLIDO DE } T_{BHB} \text{ A } T_{S2} = S_S (H_{S2} - H_{SB}) / (G_S CH_2)$$

$$\Delta TG = 1.066 \quad ^\circ\text{C}$$

$$\text{DIFERENCIA DE TEMP. PROMEDIO ENTRE EL GAS Y EL SÓLIDO ES} = ((T_{G2} - T_{S2}) + (T_{GD} - T_{BHB})) / 2$$

$$\Delta T_m = 11.536 \quad ^\circ\text{C}$$

$$N_{tog} = \Delta TG / \Delta T_m$$

$$N_{tog} = 0.092 \quad (2)\text{pag.777-778}$$

5.2.11. CÁLCULO ZONA II :

$$CH_{\text{PROMEDIO}} = (CH_1 + CH_2) / 2$$

$$CH_{\text{PROMEDIO}} = 0.276 \quad \text{Kcal/Kg de gas seco}^\circ\text{K}$$

$$\text{CAMBIO REAL DE LA TEMPERATURA DEL GAS} = T_{GC} - T_{GD}$$

$$\text{CAMBIO REAL DE LA TEMPERATURA DEL GAS} = 306.906 \quad ^\circ\text{C}$$

$$\text{CAMBIO DE LA TEMP. COMO RESULTADO DE PÉRDIDA DE CALOR} = \text{ZONA III } Q_p / (G_S CH_{\text{PROMEDIO}})$$

$$\text{CAMBIO DE LA TEMP. COMO RESULTADO DE PÉRDIDA DE CALOR} = 126.358 \quad ^\circ\text{C}$$

$$\Delta TG \text{ RESULTANTE DE LA TRANSFERENCIA DEL CALOR AL SÓLIDO} = \text{CAMBIO REAL DE LA TEM} - \text{CAMBIO DE T POR PÉRDIDAS}$$

$$\Delta TG \text{ RESULTANTE DE LA TRANSFERENCIA DEL CALOR AL SÓLIDO} = 180.548 \quad ^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_m = ((t_{GC} - t_{BH}) - (t_{GD} - t_{BH})) / \ln ((t_{GC} - t_{BH}) / (t_{GD} - t_{BH}))$$

$$\Delta T_m = 103.631 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$N_{tog} = \Delta T_G / \Delta T_m$$

$$N_{tog} = 1.742$$

| | Ntog | % |
|----------|-------|-------|
| ZONA I | 0.048 | 0.026 |
| ZONA III | 1.742 | 0.926 |
| ZONA II | 0.092 | 0.049 |

$$N_{tog \text{ TOTAL}} = 1.882 \quad (2)\text{pag.777-778}$$

EXPRESANDO LOS FLUJOS COMO Kg DE SUSTANCIA SECA / m²

$$\text{ÁREA DEL TUBO} = 0.849 \text{ m}^2$$

$$G_s = 0.845 \text{ Kg}/(\text{m}^2 \text{ S})$$

$$S_s = 0.163 \text{ Kg}/(\text{m}^2 \text{ S})$$

$$Y_{av} = (Y_1 + Y_2) / 2$$

$$Y_{av} = 0.070 \text{ Kg de agua/ Kg de gas seco}$$

$$A_v G = G_s(1 + Y_{av}) = 0.904 \text{ Kg}/(\text{m}^2 \text{ S})$$

$$U_a = (237 (A_v G)^{0.67}) / \text{DIÁMETRO DEL SECADOR}$$

$$U_a = 237 A_v G^{0.67} / D \quad (2)\text{pag.778}$$

$$U_a = 0.051 \text{ Kcal/ m}^3 \cdot ^\circ\text{K}$$

$$H_{tog} = G_s C_{H \text{ PROMEDIO}} / U_a$$

$$H_{tog} = 4.579 \text{ m}$$

$$\text{LONGITUD DEL SECADOR} = N_{tog} * H_{tog}$$

$$\text{LONGITUD DEL SECADOR} = 8.618 \text{ m}$$

5.2.12 HUMEDAD RELATIVA A LA SALIDA DEL SECADOR

HUMEDAD ABSOLUTA $Y = 1108.0000$ Kg AGUA/Kg DE AIRE SECO

HUMEDAD ABSOLUTA MOLAR $Y' = Y * PM \text{ GAS} / PM \text{ DEL AGUA}$

PRESIÓN TOTAL = P T = 574.000

$Y' = 0.178$ Kgmol de agua /Kgmol de aire seco

PRESIÓN PARCIAL= 86.901 mmHg presión parcial H2O= $Y' * PT / (1 - Y')$

TEMPERATURA DE SALIDA= 65.000 °C

PRESIÓN VAPOR= 187.5476716 PRESIÓN DE VAPOR A LA TBS DE LA MEZCLA

HR= 46.33540852

5.2.13 TEMPERATURA DE ROCÍO A LA SALIDA DEL SECADOR

HUMEDAD EN LA SALIDA DEL SECADOR $Y_1 = 0.1108$ Kg AGUA/Kg DE AIRE SECO

PRESIÓN TOTAL = P T = 574.000

Presion parcial= 86.901 $P_v = P_T * Y_1 * PM \text{ GAS SALIDA} / 18.02 / (1 + Y_1 * PM_{GAS} / 18.02)$

TEMPERATURA DE ROCÍO = 51.011 °C temperatura tanteo

PV CALCULADA= 97.248 esta presión de vapor se compara con presión parcial de arriba
si no es igual la temperatura se cambia.

T SUPUESTA 55.00 °C

TEM ROCÍO 48.746 °C

PV= 86.903 86.901 =Presión parcial

diferencia Pv - Presión parcial Df= 0.000

Df/50= 0.000 Este valor se resta a la TEM ROCÍO

5.2.14 CÁLCULO DE REVOLUCIONES DEL SECADOR:

LOS SECADORES FUNCIONAN ENTRE 50 A 100 ft/min. (1) pag 20-40

RPM PARA 50 ft/min= 4.664 rpm MÍMIMAS

RPM PARA 100 ft/min= 9.329 rpm MÁXIMAS

5.2.15 CÁLCULO DEL GAS LP NECESARIO:

$$\text{DENSIDAD DEL GAS LP} = (\text{DENSIDAD PROPANO} * \% \text{PROPANO} + \text{DENSIDAD BUTANO} * \% \text{BUTANO}) / 100$$

$$\begin{aligned} \text{DENSIDAD del gas LP} &= 0.565 && \text{Kg de gas / litro de gas} \\ \text{Kgmol de gas} &= \text{Gs/PM} * 3600 / (\text{kgmol de gas seco/Kgmol de gas LP}) \end{aligned}$$

$$\text{PM GAS LP} = 53.800 \quad \text{Kg de gas LP / Kgmol de gas LP}$$

$$\text{GAS LP} = \text{Gs} / ((\text{Gs/Kg mol de gas LP}) * \text{PESO MOLECULAR PROM. DEL AIRE SECO}) * 3600$$

$$\text{CONSUMO DE GAS LP / h} = 0.43379 \quad \text{Kgmol de gas LP/h}$$

$$\text{CONSUMO DE GAS LP/h} = \text{GAS LP} * \text{PM GAS LP}$$

$$\text{CONSUMO DE GAS LP/h} = 23.338 \quad \text{Kg de gas LP/h}$$

$$\text{LITROS DE GAS LP/h PARA EL SECADO} = \text{CONSUMO DE GAS LP/h} * \text{DENSIDAD DEL GAS LP}$$

$$\text{LITROS DE GAS LP/h PARA EL SECADO} = 41.299 \quad \text{Litros de gas LP/h}$$

$$\text{GAS LP TOTAL} = 41.299 \quad \text{Litros de gas LP/h}$$

$$\text{PRECIO DEL GAS} = 4.664 \quad \text{PESOS/Litro de gas LP}$$

$$\text{COSTO DE SECADO/h} = 192.608 \quad \text{PESOS/h}$$

$$\text{COSTO DEL GAS P/SECAR/ Kg de producto} = 0.385 \quad \text{PESOS/Kg producto seco}$$

5.2.16 EFICIENCIA TÉRMICA:

$$\text{CALOR PRODUCIDO POR EL GAS} = \Delta H_{\text{Cr}^\circ} * \text{Kgmol de gas LP / h}$$

$$\text{CALOR PRODUCIDO POR EL GAS} = 277958.331 \quad \text{Kcal / h}$$

$$\text{CALOR PERDIDO POR CUERPO SECADOR} = 95577.441 \quad \text{Kcal / h}$$

$$\text{EFICIENCIA TÉRMICA} = 65.614 \quad \%$$

La eficiencia térmica de un secador rotatorio de calor directo para temperaturas elevadas de 1000 a 1500°F varía del 55-75%. (1) pag. 20-41

5.2.17. MASA VELOCIDAD DEL AIRE :

Kg de agua generada por la combustión= $\eta_{FH2OF} \times PM_{H2O} \times Kgmol_{gas LP}$

Kg de agua generada por la combustión= 36.739 **Kg de agua formada /h**

VELOCIDAD DEL AIRE = (Gs+agua que se evapora+agua del ambiente+agua por la combustión)/ÁREA TRANSVERSAL DEL SECADOR

VELOCIDAD DEL AIRE = 700.002 **lb/h ft²**

En general se puede utilizar con seguridad una velocidad de aire de 1000 lb / (h ft²)

(1)pag.20-41

5.2.18. KILOGRAMOS DE AIRE EN LA SALIDA DEL SECADOR:

Kg de aire seco + Kg de agua =Gs+AGUA QUE SE EVAPORA+AGUA DEL AMBIENTE+AGUA POR LA COMBUSTIÓN

Kg de aire seco + Kg de agua (W)= 2905.913 **Kg/h**

5.2.19. VOLUMEN DE AIRE EN LA SALIDA DEL SECADOR:

VOLUMEN DEL VENTILADOR= (Gs/PMGAS SECO+(AGUA EVAPORA+AGUA AMBIENTE+agua por la combustión)/18)*.082*TG2 / PT

VOLUMEN DEL VENTILADOR= 3850.094 **M³/h**

5.2.20. TIEMPO DE RESIDENCIA:

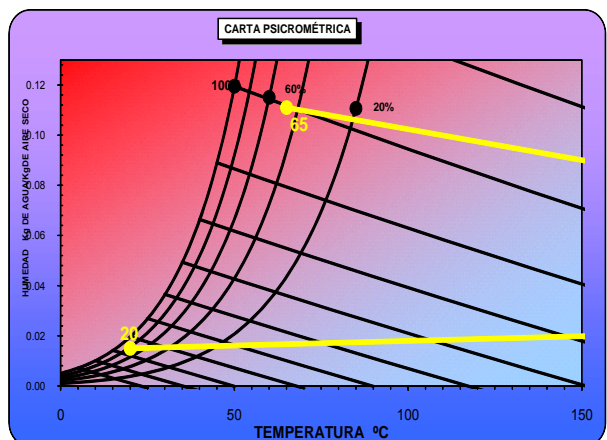
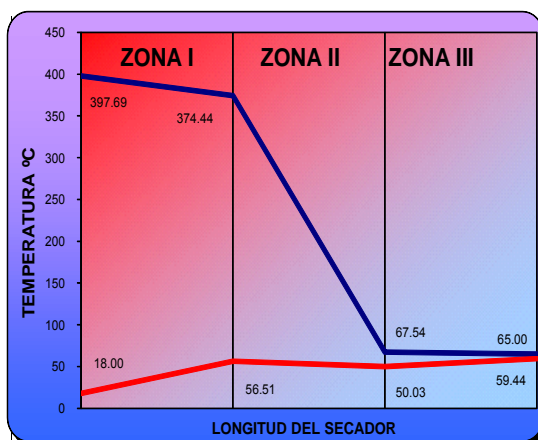
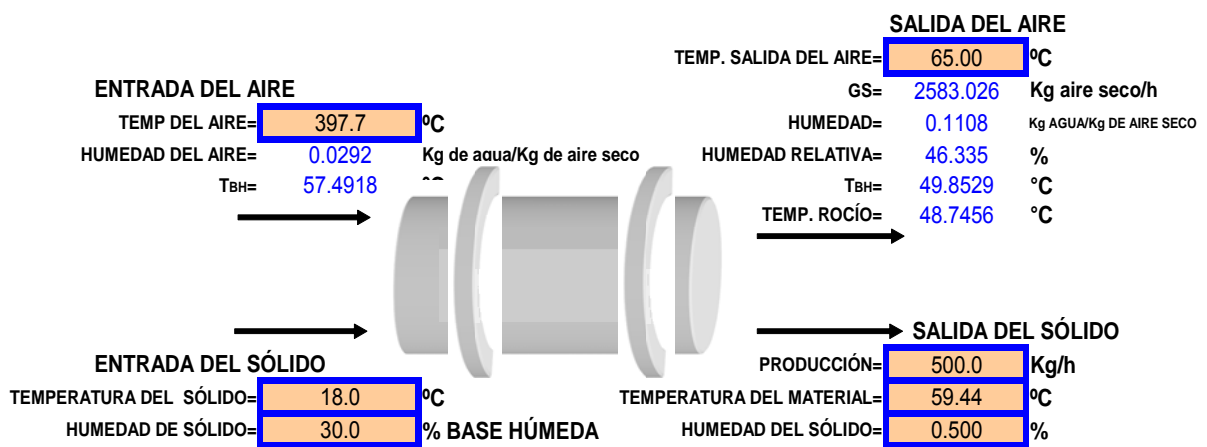
$$\theta = 0.23 L / (S N^{0.9} D) - 0.6 B L G / F \quad \text{FLUJO PARALELO}$$

(1) pag 20-40

| | | | | | |
|-----------------------------|------------------|---------|----------------------|--------|---------------------|
| Longitud del secador | L = | 9.481 | m | 31.104 | ft |
| Pendiente | S = | 0.011 | ft / ft | 10.0 | cm / L _T |
| Velocidad | N = | 4.664 | RPM | | |
| Diámetro del secador | D = | 1.040 | m | | |
| Tamaño de partícula | D _P = | 500.0 | MICRAS μ | | |
| Masa Velocidad del aire | G = | 700.002 | lb/h ft ² | | |
| Índice de alimentación | F = | 120.444 | lb/h ft ² | | |
| Tiempo de paso del material | θ = | 25.457 | min | | |

5.2.21. DATOS NECESARIOS PARA EL CÁLCULO DEL SECADOR

| | | |
|--|---------|-------------|
| TEMPERATURA AMBIENTE T_{amb} = | 20.0 | °C |
| TEMP. BULBO HÚMEDO DEL AMBIENTE $T_{BH\ amb}$ = | 17.0 | °C |
| PRESIÓN ATMOSFÉRICA (PT) = | 574.0 | mmHg |
| DIFERENCIA DE TEMPERATURA ENTRE EL GAS SALIDA Y PRODUCTO = | 5.56 | °C (2) |
| ESPESOR DE AISLANTE (LANA MINERAL) DEL SECADOR E_{ais} = | 0.0000 | in |
| DIÁMETRO DEL SECADOR D_s = | 1.040 | M |
| DICIEMBRE 2010 PESOS/ KW DE LUZ = | 3.100 | PESOS/KW |
| DICIEMBRE 2010 PESOS / LITRO DE GAS = | 4.664 | PESOS/LITRO |
| SUELDO POR PERSONA = | 150.000 | PESOS/DÍA |



APÉNDICE E

LONGITUD EN m EN CADA ZONA

| | FRACCIÓN PÉRDIDA DE CALOR | LONGITUD m | % N_{TOG} |
|----------|---------------------------|------------|-------------|
| ZONA I | 0.0469323 | 0.4044963 | 2.533 |
| ZONA II | 0.9415757 | 8.1151706 | 92.560 |
| ZONA III | 0.0114920 | 0.0990464 | 4.907 |

LONGITUD TOTAL = 8.619 m

5.2.22. RESULTADOS DE LOS CÁLCULOS

| | | | | |
|--|------------|-------------------------|----------------------------------|---|
| HUMEDAD DEL AMBIENTE= | 0.0149 | Kg AGUA/Kg DE AIRE SECO | | |
| Nt _{og} TOTAL = | 1.882 | | longitud para el cálculo= | 9.481 m |
| LONGITUD DEL CUERPO CALCULADO= | 8.619 | m | LONGITUD propuesta p/fabricación | 9.481 m |
| EVAPORACIÓN= | 210.709 | Kg AGUA/h | | |
| VELOCIDAD DEL AIRE DENTRO DEL SECADOR= | 700.002 | lb/h ft ² | 0.950 | Longitud fija = m |
| COSTO DEL GAS LP PARA SECAR= | 0.38522 | PESOS/Kg | | |
| CONSUMO DE GAS LP= | 41.299 | L/h | | |
| VOLUMEN DEL VENTILADOR= | 3850.094 | m ³ /h | velocidad aire = | 1.259 m/s del aire |
| VOLUMEN DEL VENTILADOR (FCM)= | 2266.080 | ft ³ /min | | 4.532 Km/h |
| CALOR SUMINISTRADO POR EL QUEMADOR= | 277958.331 | KCAL/h | | |
| CALOR PERDIDO POR EL CUERPO= | 95577.441 | KCAL/h | | |
| EFICIENCIA TÉRMICA= | 65.614 | % | | |
| rpm MÍNIMA= | 4.664 | | | |
| rpm MÁXIMA= | 9.329 | | | |

TUBERÍA DE SALIDA DE AIRE DEL SECADOR AL FILTRO

| | | | |
|---|--|-------------------|----------------------------|
| DIÁMETRO TUBERÍA DE AIRE SALIDA (D) = | 12.0 | in | |
| VISCOSIDAD DEL AIRE SALIDA (μ) = | 0.0196 | CENIPOISE | APÉNDICE D |
| DENSIDAD DEL AIRE SALIDA (ρ) = | 0.754764 | Kg/m ³ | 0.04708 lb/ft ³ |
| VELOCIDAD DEL AIRE SALIDA (v) = | 14.657 | m/s | |
| NRE= | 1.720E+05 | | NRE= D v ρ / μ (11) |
| No. CODOS 90° = | 1.0 | | |
| COEFICIENTE DE RESISTENCIA (K) = | 2.328 | (11)pag A-49 | |
| FACTOR DE FRICCIÓN (f) = | 0.0250 | OBTENER DATO | (11)pag A-42 - A-43 |
| LONGITUD DE TUBERÍA= | 4.0 | m | |
| ΔP= | 0.6253 K W ² / (D ⁴ ρ) | | (11)pag 3-6 |
| ΔP= | 0.002 bar | | 0.758 IN DE AGUA |

SELECCIÓN DEL TAMAÑO DEL VENTILADOR

Hp VENTILADOR AIRFOIL SQA PLUG FAN

VOLUMEN DEL VENTILADOR (FCM)= 2266.080 ft³/min

| TAMAÑO | 10 | 12 1/4 | 13 1/2 | 15 | 16 1/2 | 18 1/4 | 20 |
|---------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| rango de FCM | 1298 A 1770 | 1770 A 2992 | 2992 A 3638 | 3638 A 5016 | 5016 A 6360 | 6360 A 7800 | 7800 A 11700 |
| Hp VENTILADOR | 3.785 | 3.540 | 3.523 | 3.754 | 4.230 | 4.948 | 5.957 |

APÉNDICE E

TAMAÑO 12 1/4
Hp DEL VENTILADOR= 3.540 Hp VENTILADOR

5.2.23. COSTOS DE SECADO Y MOLIENDA

| | | | | |
|--|----------|----------|-------------|----------|
| | | | Hp MBW | \$/Kg |
| COSTO POR CONSUMO LUZ DEL VENTILADOR= | 0.01637 | PESOS/Kg | 9.519 | 0.04401 |
| COSTO POR MANO DE OBRA 2 TRABAJADORES= | 0.08571 | PESOS/Kg | | |
| COSTO DE GAS LP PARA SECADO= | 0.385216 | PESOS/Kg | | |
| COSTO DE LUZ PARA MOTOR TRANSMISIÓN SECADOR= | 0.034675 | PESOS/Kg | MOTOR 7.5HP | |
| COSTO DE LUZ PARA SOPLADOR DE CACAHUATE= | 0.046233 | PESOS/Kg | MOTOR 10HP | |
| COSTO DE LUZ PARA EL MOLINO= | 0.034675 | PESOS/Kg | MOTOR 7.5HP | |
| COSTO TOTAL = | 0.602879 | PESOS/Kg | | 0.630526 |

5.2.24. OPTIMIZACIÓN DEL SECADOR

Se hicieron corridas de cálculo a diferentes capacidades del secador que van desde 200 a 650 Kg/h, variando la temperatura del gas de entrada, variando la masa velocidad del aire en el secador, manteniendo constante:

| | | | |
|--|----------|--------------|----------------------|
| TEMPERATURA AMBIENTE T_{amb} | = | 20 | °C |
| TEMP. BULBO HÚMEDO DEL AMBIENTE $T_{BH\ amb}$ | = | 17 | °C |
| PRESIÓN ATMOSFÉRICA (PT) | = | 574 | mmHg |
| DIFERENCIA DE TEMPERATURA ENTRE EL GAS SALIDA Y PRODUCTO | = | 5.56 | °C |
| ESPESOR DE AISLANTE (LANA MINERAL) DEL SECADOR E_{ais} | = | 0 | in |
| DIÁMETRO DEL SECADOR D_s | = | 1.04 | M |
| PESOS/ KW DE LUZ | = | 3.10 | PESOS/KW |
| PESOS / LITRO DE GAS | = | 4.664 | PESOS/LITRO |
| SUELDO POR PERSONA | = | 150 | PESOS/DÍA |
| HUMEDAD DEL SÓLIDO ENTRADA | = | 30 | % BASE HÚMEDA |
| HUMEDAD DEL SÓLIDO SALIDA | = | 0.5 | % BASE HÚMEDA |

El diámetro lo consideramos constante ya que la compañía cuenta con 5 cilindros de acero al carbón SA-285C de 1.04m de diámetro, 1.90m de longitud y $\frac{1}{4}$ de espesor, el espesor es ideal para un secador de un metro de diámetro, porque antes de la fabricación del secador tuve la oportunidad de ver funcionando dos secadores, uno con un espesor de $\frac{1}{8}$ " y el otro de $\frac{1}{4}$ ", de 8m y 10m de largo respectivamente.

La diferencia de temperatura entre el gas de salida del secador y temperatura de salida del producto se tomo de 5.56°C , porque así se encuentra en los datos típicos de funcionamiento de secadores rotatorios de calor directo y corriente paralela.⁽¹⁾

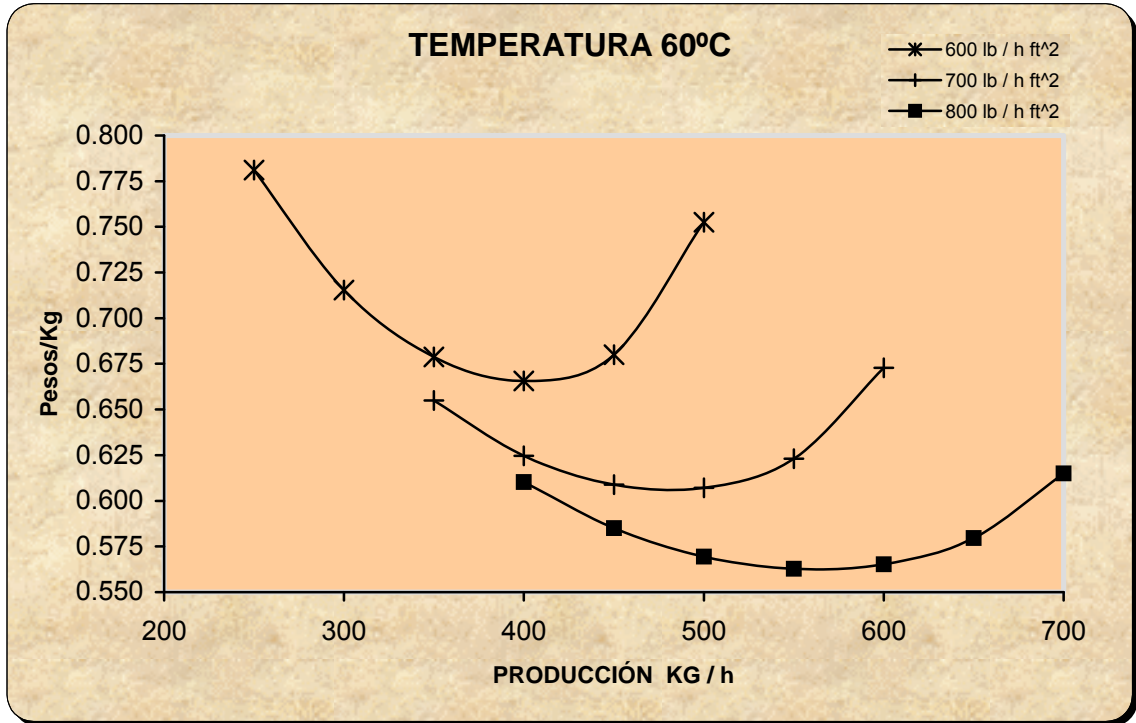
En las tablas No. 5, 6, 7 y 8, están los datos obtenidos de los cálculos a diferentes temperaturas del gas de salida del secador, observamos que al aumentar la masa velocidad del gas de 600 a 800 lb/h ft² en cada una de las tablas el costo baja y la producción aumenta, como podemos verlo en las gráficas 5, 6, 7 y 8, pero a mayor masa velocidad hay mayor arrastre de polvo. La masa velocidad del aire segura para evitar el espolvoramiento de los datos típicos de funcionamiento de secadores rotatorios de calor directo y corriente paralela, es de 1000 lb/h ft².⁽¹⁾

TABLA No.7

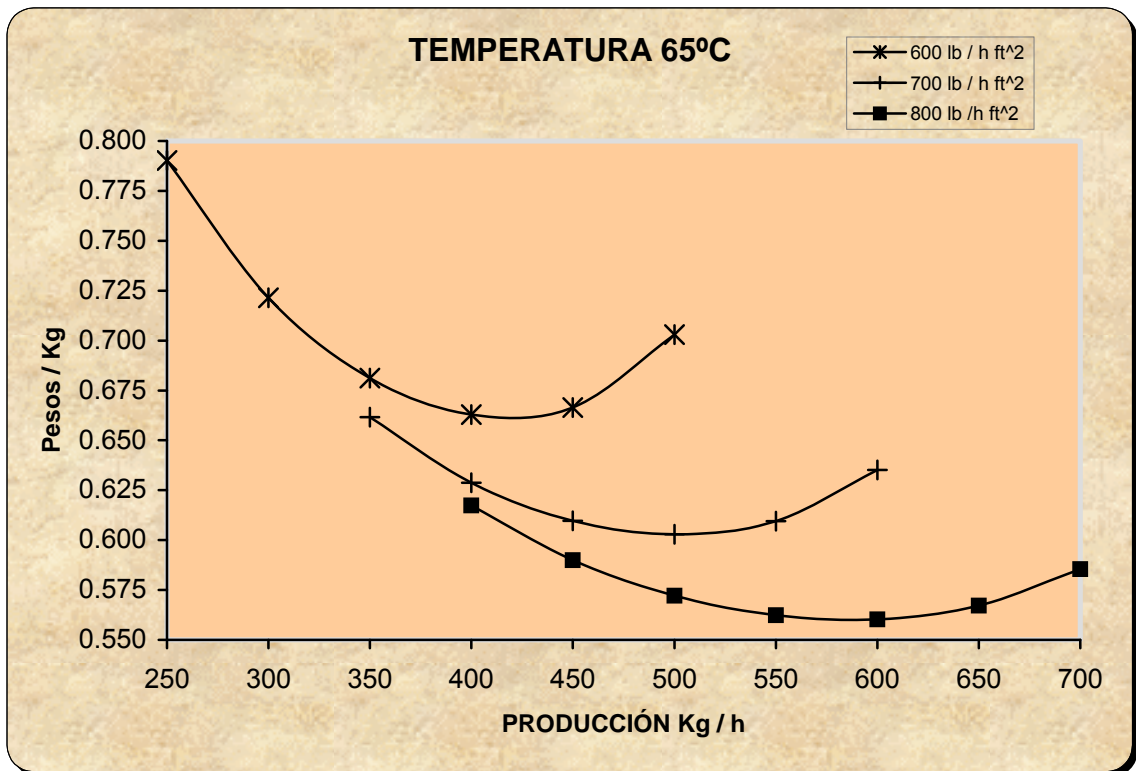
DIÁMETRO DEL SECADOR 1.04m

TEMPERATURA DE GAS DE SALIDA 70°C

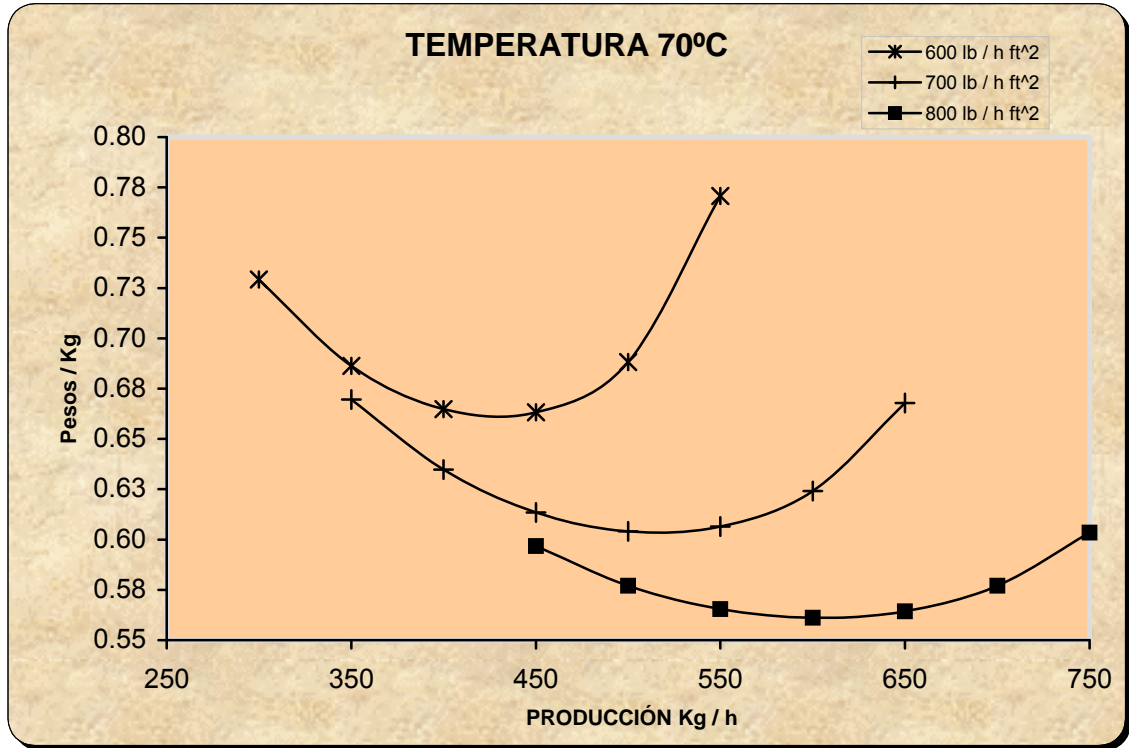
| PRODUCCIÓN | TEMPERATURA GAS ENTRADA °C | TEMPERATURA GAS SALIDA °C | TEMPERATURA DE PRODUCTO °C | TEMPERATURA DE ROCÍO °C | HUMEDAD RELATIVA SALIDA % | N _{rog} | LONGITUD METROS | VELOCIDAD DEL GAS lb/h ft ² | VOLUMEN DEL GAS ft ³ /min | COSTO DE SECADO PESOS/Kg | TAMAÑO VENTILADOR | COSTO TOTAL PESOS/Kg |
|--|----------------------------|---------------------------|----------------------------|-------------------------|---------------------------|------------------|-----------------|--|--------------------------------------|--------------------------|-------------------|----------------------|
| MASA VELOCIDAD DEL AIRE 600 lb/h ft² | | | | | | | | | | | | |
| 300 | 271.61 | 70.00 | 64.44 | 43.07 | 27.819 | 1.536 | 7.25 | 600.02 | 1,953.30 | 0.370375 | 12 1/4 | 0.729159 |
| 350 | 321.33 | 70.00 | 64.44 | 45.46 | 31.496 | 1.626 | 7.72 | 600.00 | 1,960.13 | 0.378732 | 12 1/4 | 0.686327 |
| 400 | 380.74 | 70.00 | 64.44 | 47.69 | 35.276 | 1.679 | 8.02 | 600.01 | 1,966.50 | 0.395577 | 12 1/4 | 0.664776 |
| 450 | 455.59 | 70.00 | 64.44 | 49.82 | 39.244 | 1.689 | 8.13 | 600.00 | 1,972.00 | 0.423980 | 12 1/4 | 0.663310 |
| 500 | 559.00 | 70.00 | 64.44 | 51.96 | 43.593 | 1.642 | 7.97 | 600.00 | 1,975.88 | 0.472839 | 12 1/4 | 0.688262 |
| 550 | 734.69 | 70.00 | 64.44 | 54.36 | 48.989 | 1.488 | 7.33 | 600.00 | 1,975.58 | 0.574937 | 12 1/4 | 0.770775 |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| MASA VELOCIDAD DEL AIRE 700 lb/h ft² | | | | | | | | | | | | |
| 350 | 263.73 | 70.00 | 64.44 | 42.99 | 27.711 | 1.571 | 7.80 | 700.00 | 2,279.30 | 0.358474 | 12 1/4 | 0.669586 |
| 400 | 302.66 | 70.00 | 64.44 | 45.04 | 30.814 | 1.660 | 8.28 | 700.01 | 2,286.46 | 0.362443 | 12 1/4 | 0.634743 |
| 450 | 346.90 | 70.00 | 64.44 | 46.95 | 33.966 | 1.725 | 8.64 | 700.01 | 2,293.23 | 0.371414 | 12 1/4 | 0.613524 |
| 500 | 398.48 | 70.00 | 64.44 | 48.75 | 37.198 | 1.764 | 8.89 | 700.00 | 2,299.54 | 0.386055 | 12 1/4 | 0.604009 |
| 550 | 460.91 | 70.00 | 64.44 | 50.49 | 40.560 | 1.774 | 8.99 | 700.00 | 2,305.17 | 0.408265 | 12 1/4 | 0.606450 |
| 600 | 541.07 | 70.00 | 64.44 | 52.22 | 44.155 | 1.746 | 8.92 | 700.00 | 2,309.65 | 0.442425 | 12 1/4 | 0.624128 |
| 650 | 655.68 | 70.00 | 64.44 | 54.04 | 48.233 | 1.661 | 8.56 | 700.00 | 2,311.83 | 0.500099 | 12 1/4 | 0.667840 |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| MASA VELOCIDAD DEL AIRE 800 lb/h ft² | | | | | | | | | | | | |
| 450 | 289.85 | 70.00 | 64.44 | 44.73 | 30.330 | 1.684 | 8.77 | 799.55 | 2,611.20 | 0.351168 | 12 1/4 | 0.596699 |
| 500 | 324.77 | 70.00 | 64.44 | 46.39 | 33.028 | 1.752 | 9.16 | 800.01 | 2,619.72 | 0.356042 | 12 1/4 | 0.577111 |
| 550 | 364.07 | 70.00 | 64.44 | 47.98 | 35.781 | 1.804 | 9.47 | 800.00 | 2,626.45 | 0.364406 | 12 1/4 | 0.565443 |
| 600 | 408.90 | 70.00 | 64.44 | 49.49 | 38.592 | 1.837 | 9.69 | 800.01 | 2,632.82 | 0.376721 | 12 1/4 | 0.561062 |
| 650 | 461.44 | 70.00 | 64.44 | 50.95 | 41.496 | 1.849 | 9.80 | 800.00 | 2,638.61 | 0.394134 | 12 1/4 | 0.564343 |
| 700 | 525.46 | 70.00 | 64.44 | 52.40 | 44.545 | 1.835 | 9.78 | 800.00 | 2,643.57 | 0.418907 | 12 1/4 | 0.576996 |
| 750 | 608.47 | 70.00 | 64.44 | 53.88 | 47.854 | 1.786 | 9.59 | 800.00 | 2,647.09 | 0.455884 | 12 1/4 | 0.603459 |



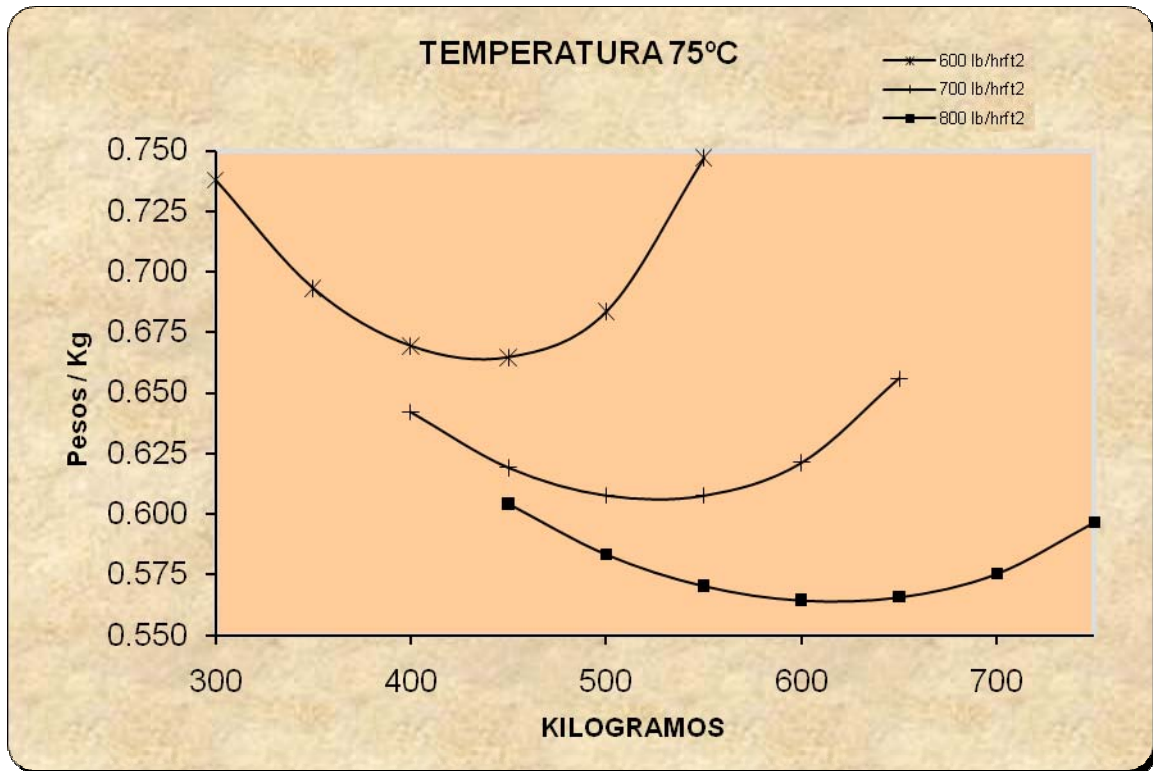
GRÁFICA No.5
COSTO TOTAL DE SECADO EN FUNCIÓN DE LA PRODUCCIÓN



GRÁFICA No.6
COSTO TOTAL DE SECADO EN FUNCIÓN DE LA PRODUCCIÓN



GRÁFICA No.7
COSTO TOTAL DE SECADO EN FUNCIÓN DE LA PRODUCCIÓN



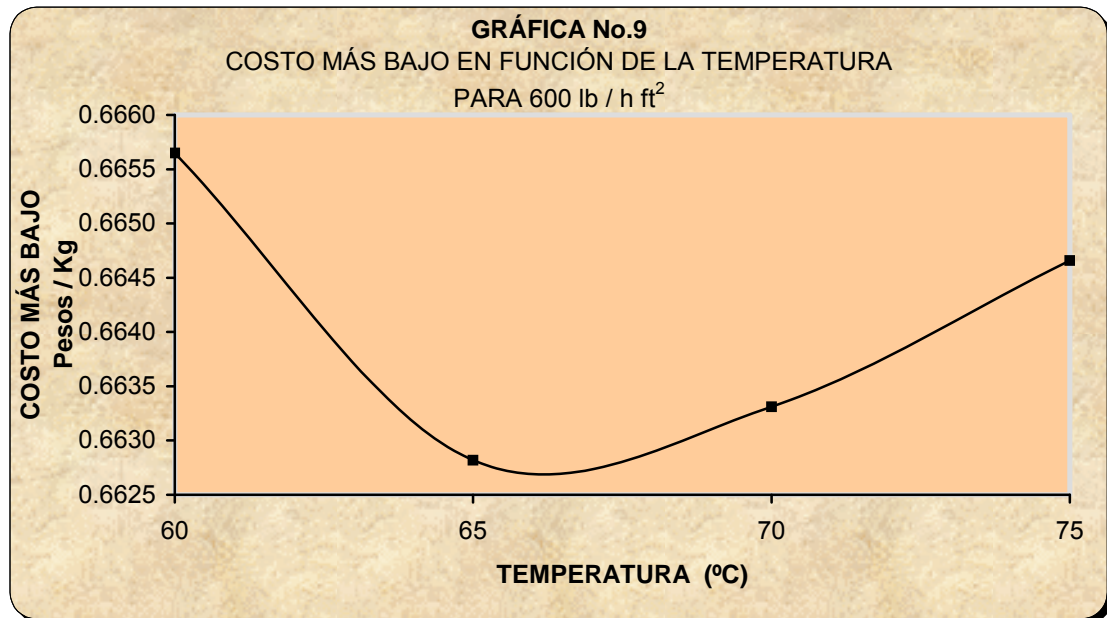
GRÁFICA No.8
COSTO TOTAL DE SECADO EN FUNCIÓN DE LA PRODUCCIÓN

En la gráfica 9 la masa velocidad de 600 lb/h ft² en función de la temperatura de gas de salida, observamos que el costo más bajo se encuentra a una temperatura de 66°C, también a esta temperatura es el costo más bajo para la masa velocidad de 700 lb/h ft² y 800 lb/h ft². Como se muestra en las gráficas 10 y 11.

Entonces la temperatura de salida del aire de 66°C es ideal para un secador de 1.04m de diámetro, a cualquier masa velocidad de aire.

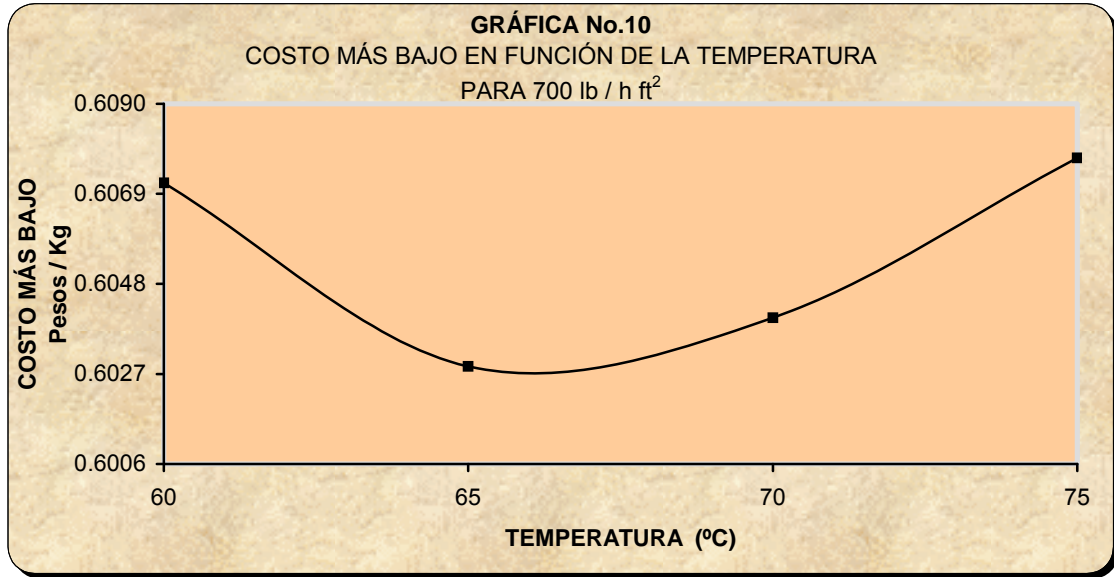
Datos para la gráfica No. 9

| TEMPERATURA | COSTO MÁS BAJO |
|-------------|----------------|
| 60 | 0.665649 |
| 65 | 0.662820 |
| 70 | 0.663310 |
| 75 | 0.664658 |



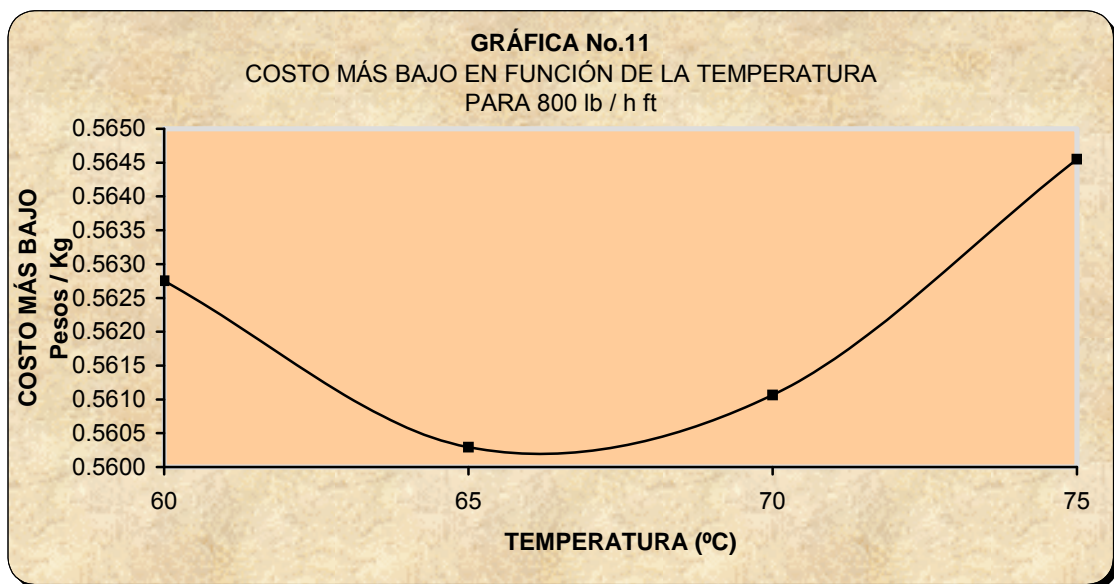
Datos para la gráfica No. 10

| TEMPERATURA | COSTO MAS BAJO |
|-------------|----------------|
| 60 | 0.607155 |
| 65 | 0.602880 |
| 70 | 0.604009 |
| 75 | 0.607741 |



Datos para la gráfica No.11

| TEMPERATURA | COSTO MAS BAJO |
|-------------|----------------|
| 60 | 0.562754 |
| 65 | 0.560291 |
| 70 | 0.561062 |
| 75 | 0.564550 |



Fijando la velocidad del gas a 700 lb/h ft^2 , que corresponde a un 30% abajo de la velocidad recomendada, para una temperatura de gas de salida de 65°C es el costo más bajo, con una longitud del secador de 9.48m, una producción de 500 Kg/h, un volumen de gas de $2,266.08 \text{ ft}^3/\text{min}$ a la temperatura del gas de salida de 65°C , gráfica No.10.

SIGNIFICADO DE LOS TÍTULOS DE LAS TABLAS 5, 6, 7 Y 8.

PRODUCCIÓN

Es la cantidad de material seco que sale del secador con una humedad de 0.5% base húmeda.

TEMPERATURA DEL PRODUCTO

Es la temperatura del material al final del secador, esta temperatura se obtuvo como la diferencia de temperatura entre el gas de salida y la temperatura del producto de 5.56°C . (1) pag. 20-40

TEMPERATURA DE ROCÍO

Es la temperatura de rocío del gas de salida.

N_{TOG}

Número de unidades de transferencia de calor, se ha descubierto que los secadores rotatorios son más económicos cuando funcionan entre $1.5 < N_{\text{TOG}} < 2.5$. (1) PAG. 20-40

VELOCIDAD DEL GAS

La masa velocidad del aire segura para evitar el espolvoramiento de los datos típicos de funcionamiento de secadores rotatorios de calor directo y corriente paralela, es de 1000 lb/h ft^2 con sólidos de malla 35(1).

COSTO DE SECADO

Corresponde sólo al costo del gas LP para secar un Kg de producto a la humedad deseada.

Hp VENTILADOR

Es la potencia requerida para mover el flujo de aire a una presión hidrostática de 7 in de H₂O, es importante mencionar que hay que hacer corrección de temperatura y altitud. Este dato se utilizó sin hacer esta corrección porque desconocemos la caída de presión en el filtro de lonas.

TAMAÑO DEL VENTILADOR

Es el tamaño del ventilador marca CHICAGO BLOWER modelo SQA para manejar el flujo del aire necesario para el secador a temperatura ambiente y a 1 atm.

COSTO TOTAL

Corresponde al costo de mano de obra, consumo de luz por el soplador de cacahuete para el transporte de material seco que sale del molino de martillos hacia filtro del molino, consumo de luz por el ventilador del secador, costo del gas LP para secar un Kg de producto a la humedad deseada, consumo de luz del motor para el cuerpo del secador.

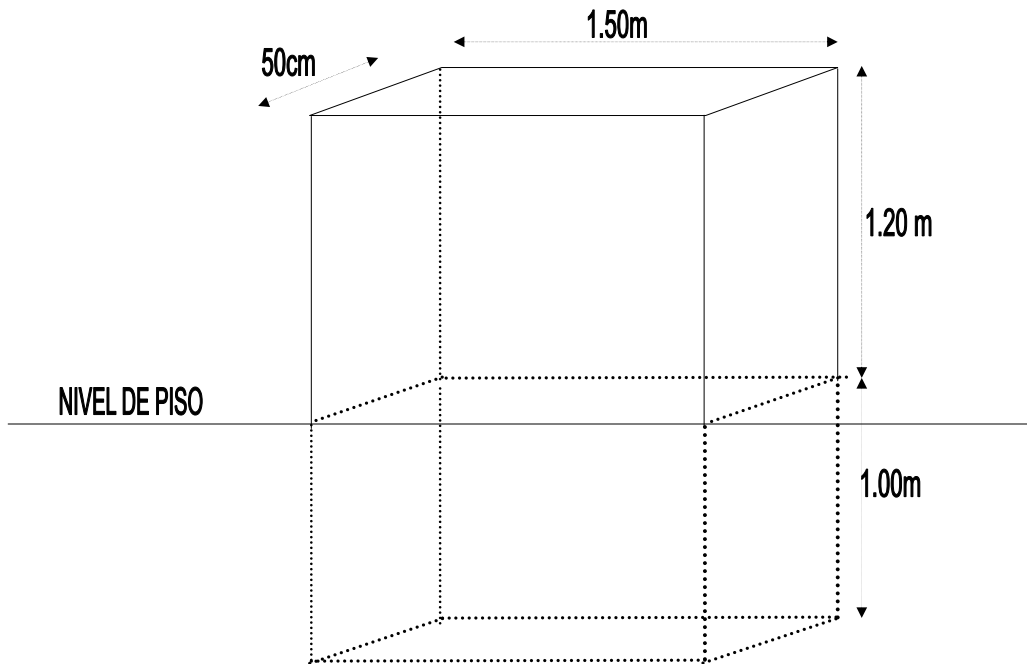
6. FABRICACIÓN DE SECADOR

6.1. CUERPO Y BASE DE SECADOR

Con los datos obtenidos del cálculo, se empezó la fabricación del secador, con un diámetro de 1.04m y una longitud de 9.5m, este cuerpo se fabricó con 5 cilindros de 1.04m de diámetro, una longitud de 1.9m, y un espesor de $\frac{1}{4}$ ", material de acero al carbón, con un peso aproximado a 310.4 Kg c/u (densidad del hierro = 7.874 g/cm^3), el peso total del cuerpo del secador es de 1,552 Kg.

Estos cilindros se soldaron alineándolos uno a uno, procurando penetrar la soldadura mayor o igual a $\frac{1}{8}$ ", para que quede perfectamente soldado por ambos lados.

Después de formar el cuerpo del secador, se empezaron hacer dos bases de concreto para soportar 1,552Kg del cuerpo del secador, más el peso de las rodajas, el peso del material a lo largo del cuerpo del secador, el peso de espas y la vibración que generaría en su trabajo, estas bases tuvieron que ser suficientemente fuertes para este esfuerzo, se hicieron en el piso dos agujeros con una profundidad de 1.0m y un ancho de 50 cm, separados entre sí de 4.25m, antes de rellenarlas de concreto se reforzaron con varilla y anillos de $\frac{3}{8}$ ", hasta la altura de 1.20m sobre el nivel de piso, dejando 8 tornillos de 50cm de largo y 1" de diámetro anclados al concreto para atornillar las rodajas donde asentaría el secador, la altura de la base de 1.20m se calculó en función de la caja de humo y el molino de martillos que se pondría debajo, las dimensiones de la base se muestra en la siguiente figura:



Las ruedas de hierro están diseñadas para poder mover la inclinación del cilindro del secador, las ruedas se encuentran en una base de hierro macizo y se pueden acercar y alejar, al separarse entre ellas el cilindro bajaría, al juntarse el cilindro subiría.

Se colocaron las aspas de elevación, dentro del cuerpo del secador, la altura de la aspa radial en un secador directo varía de 1/12 a 1/18 del diámetro del secador⁽¹⁾ :

$$\text{Diámetro} = 1.04 \text{ m} = 40.94 \text{ in}$$

$$\text{Altura de aspa mínimo} = 40.94/18 = 2.27 \text{ in}$$

$$\text{Altura de aspa máximo} = 40.94/12 = 3.41 \text{ in}$$

Número de aspas: el número de aspas oscila de 2D a 3D, siendo

$$D = \text{diámetro en ft}^{(1)}.$$

$$\text{Diámetro} = 1.04\text{m} = 3.41 \text{ ft}$$

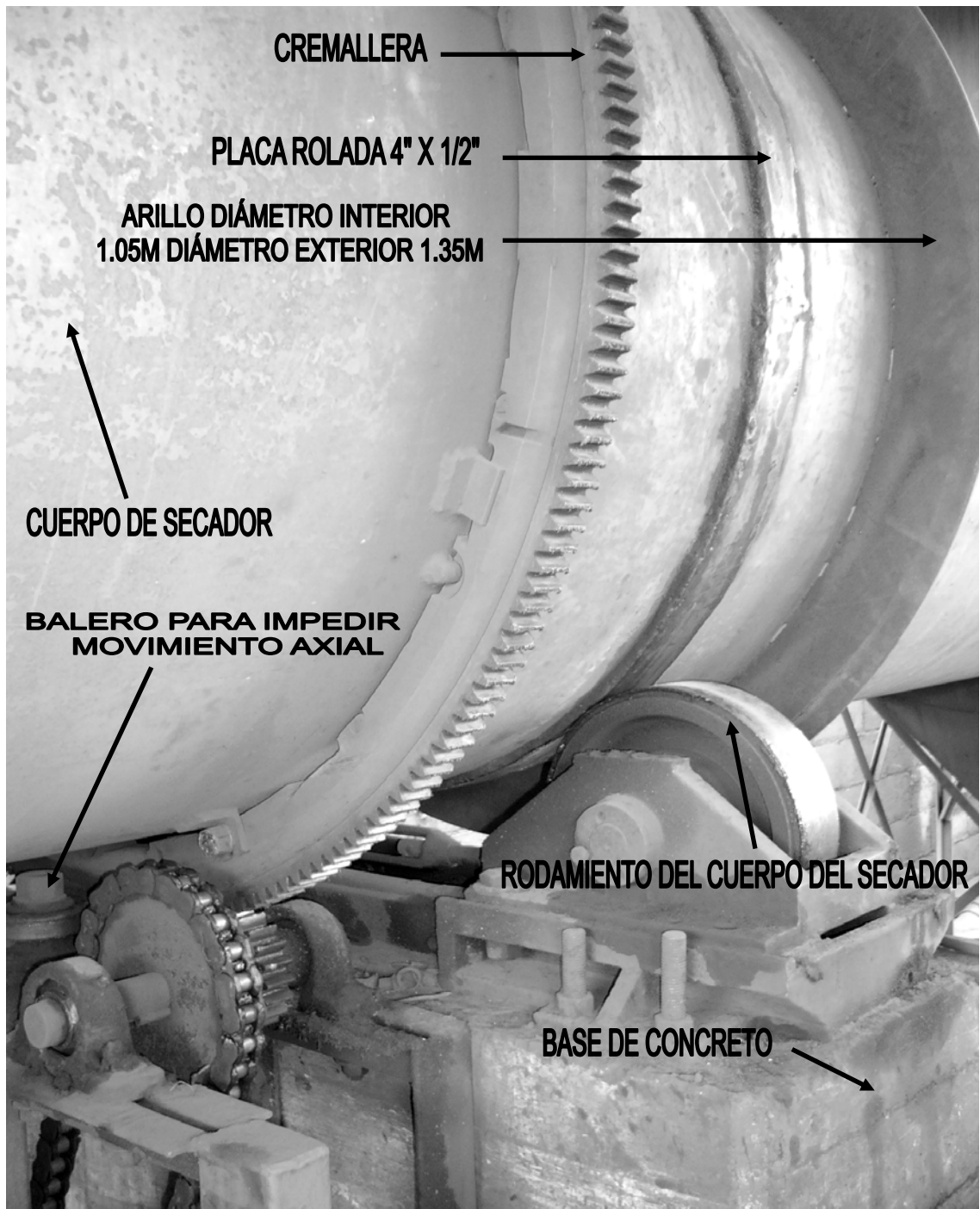
El número de aspas mínimo = $2 * 3.41 = 6.82$

El número de aspas máximo = $3 * 3.41 = 10.23^{(1)}$

Se colocaron 8 aspas de 3" por 1/4", ya que estos valores se encuentran dentro del rango recomendado, dejando al final del secador un espacio de 0.86m (10%) sin aspas para disminuir el arrastre de sólido, quedando el cuerpo del secador de 8.64 m, esta distancia dividiéndola en tres secciones, quedan de 2.88 m, en la primera sección se colocaron aspas planas, los primeros 40 cm con aspas curvas para mover el material con mayor rapidez hacia el interior del secador, la segunda sección se colocaron aspas a 45° y la última sección se colocaron aspas a 90°⁽¹⁾. El peso total aproximado de aspas es 263Kg.

Después se colocó al inicio del secador un arillo de hierro de 1.03m de diámetro exterior, 0.74m diámetro interior y un espesor de 1/4", para impedir que el material que se introduce salga y además para ayudar a la circunferencia del cilindro que sea lo más perfecta posible.

Enseguida se colocó la cremallera de 1.20 m de diámetro por 2" de ancho, esta cremallera no se fijo en ese momento con tornillos ya que se decidió esperar a subir el cilindro para fijarla en el lugar deseado. Se soldó una placa rolada de 1.04m por 4" ancho y 1/2" de espesor como asiento para cada rueda para impedir que el cuerpo del secador se desgaste con el trabajo, a los 25 cm de estos asientos, se instaló un arillo de 1.05m de diámetro interior y 1.35m de diámetro exterior, para reforzar el cuerpo, obligarlo a tener una circunferencia perfecta y disminuir el brincoteo del cuerpo cuando esté trabajando.



6.2. CÁLCULOS DE LA TRANSMISIÓN

Velocidad periférica recomendada esta entre 50-100 ft/min entonces:

Díámetro del cuerpo del secador $1.04\text{m} = 104\text{ cm}$

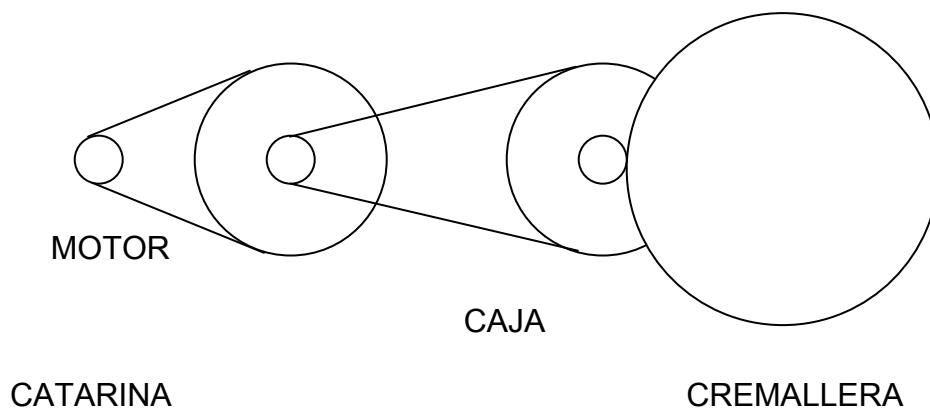
Perímetro del cuerpo del secador $p = 104 * 3.1416 = 326.72$

cm/Rev $P = 0.7193\text{ ft/Rev}$

RPM mínimas $\text{RPM} = 50\text{ ft/min} / 0.7193 = 69.51\text{ rpm}$

RPM máximas $\text{RPM} = 100\text{ft/min} / 0.7193 = 139.02\text{ rpm}$

Se utilizó una caja de velocidades automotriz para tener flexibilidad en la velocidad en el cuerpo del secador, tomaremos la primera velocidad de la caja como las RPM mínima y la segunda velocidad como RPM máxima.



Hay que encontrar la relación de cada una de las etapas, tomando en cuenta las medidas comerciales de poleas y catarinas para obtener las revoluciones deseadas del cuerpo del secador, en la primera etapa de motor a caja banda en "B", en la segunda etapa cadena paso 80 y en la tercera etapa engrane y cremallera.

Datos:

Motor 1715 RPM, 4 polos

Relación de caja: primera 6.4: 1

Segunda 3.09: 1

Relación de engrane a cremallera:

Diámetro de cremallera 117.5 cm

Diámetro de engrane 3.5" = 8.89 cm

Relación engrane a cremallera 13.217 : 1

Para las revoluciones por minuto del cuerpo del secador de 9.32 RPM, fijamos la segunda velocidad de la caja, necesitamos la polea más pequeña que le quede a la flecha del motor de 7.5 Hp, que en este caso es de 3" y fijando también la polea para la entrada de la caja que no sea tan grande, será de 8".

POR EL LADO DEL MOTOR:

Motor 1715 RPM relación motor a caja = $8 / 3 = 2.66 : 1$

RPM entran a caja = $1715 / 2.66 = 643.14$ RPM

RPM salen de la caja = $643.14 / 3.09 = 208.13$ RPM

POR EL LADO DE LA CREMALLERA:

RPM del cuerpo del secador 9.32 RPM

RPM del engrane de 3.5" = $9.32 * 13.217 = 123.18$ RPM

Entonces la relación de catarinas = RPM que salen de caja/RPM de engrane 3.5"

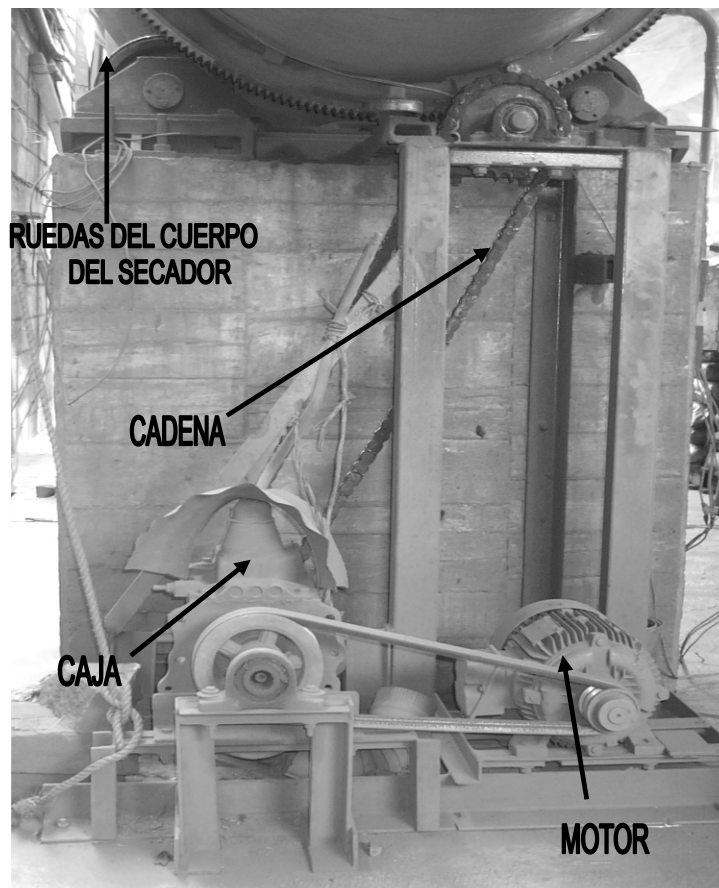
Relación de catarinas = $208.13 / 123.18 = 1.6896$

Si suponemos que la catarina de la caja sea de 14 dientes entonces la catarina del lado del engrane:

$$\text{Dientes de catarina de engrane} = 14 * 1.6896 = 23.52$$

Entonces catarina comercial de engrane = 24 dientes paso 80.

Se acopla el motor de 7.5 Hp 4 polos con una caja de velocidades por medio de dos bandas en B, en una base de hierro formada con ángulo de $1 \frac{1}{2}$ " x $\frac{1}{4}$ " de espesor, para el motor, dejando agujeros alargados en la base de hierro para poder tensar la banda, toda la estructura de la transmisión se fijó al piso y a la base del secador y quedó como se muestra en la siguiente imagen:



6.3. POTENCIA NECESARIA PARA TRANSMISIÓN

La potencia total requerida para mover un secador rotatorio con aspas se calcula aplicando la siguiente formula:

$$\text{Potencia (Hp)} = \frac{N (4.75 d w + 0.1925 DW + 0.33 W)}{100,000}$$

- N Velocidad de rotación (RPM)
- d Diámetro del cuerpo (ft)
- w Carga de material (lb)
- D Diámetro donde asienta el secador (ft)
- W carga total (cuerpo y material) (lb)

$$N = 9.32 \text{ rpm}$$

$$d = 1.04\text{m} = 3.41\text{ft}$$

$w = 1210.5 \text{ l} * 1.3473\text{Kg/l} = 1630.9\text{Kg} = 3592.3 \text{ lb}$. Se considera el 15% del volumen del cuerpo.

$$D = 1.04\text{m} + 0.05\text{m} = 1.09\text{m} = 3.57\text{ft}$$

$$W = 1552\text{Kg cuerpo} + 263.3\text{Kg aspas} + 1630.9\text{Kg material} = 3446.2\text{Kg} \\ = 7590.74\text{lb}$$

Potencia (Hp) = 5.93, el motor que se pone es de 7.5 Hp.

6.4. CAJA DE HUMO

La fabricación de la caja de humo tiene que ser de una área transversal mayor que la del cuerpo del secador para que el polvo baje su velocidad y disminuir su arrastre al filtro de lonas.

$$\text{Área del cilindro} = \text{PI} * D^2 / 4 = .85 \text{ m}^2$$

La caja de humo la hicimos con un 50% más de área transversal.

$$\text{Área de la caja de humo} = 0.85 * 1.5 = 1.275 \text{ m}^2.$$

Fijando el ancho a 1.30m ya que el cuerpo del secador es de 1.04m, dejando 15cm por lado, obtenemos el largo de:

Largo de la caja de humo $= 1.275 / 1.3 = 98 \text{ cm}$, se hizo de 1.0m y quedaría el Área transversal de la caja de humo $= 1.3 \text{ m} * 1.0 \text{ m} = 1.3 \text{ m}^2$.

En la parte superior se puso una salida para un tubo de 12 in de diámetro para extraer el aire húmedo, este diámetro se calculó en función de la caída de presión producida por el tubo.

La compañía tiene un ventilador equivalente al tamaño 12.25 de CHICAGO BLOWER, modelo 36A SQA SW, velocidad variable, velocidad máxima de 4300 rpm, de la gráfica de la curva de trabajo del ventilador podemos ver que a una presión estática de 7 in de agua tenemos un flujo máximo de 2266 CFM, a una presión atmosférica de 574mmHg, temperatura 65°C, RPM 4280, Bhp=3.56, eficiencia 70.1%⁽¹²⁾. Como se muestra en la siguiente gráfica:

CURVA DE TRABAJO PARA VENTILADOR 36A SQA

Descripción:

Tipo del Ventilador: Ventilador centrífugo Airfoil

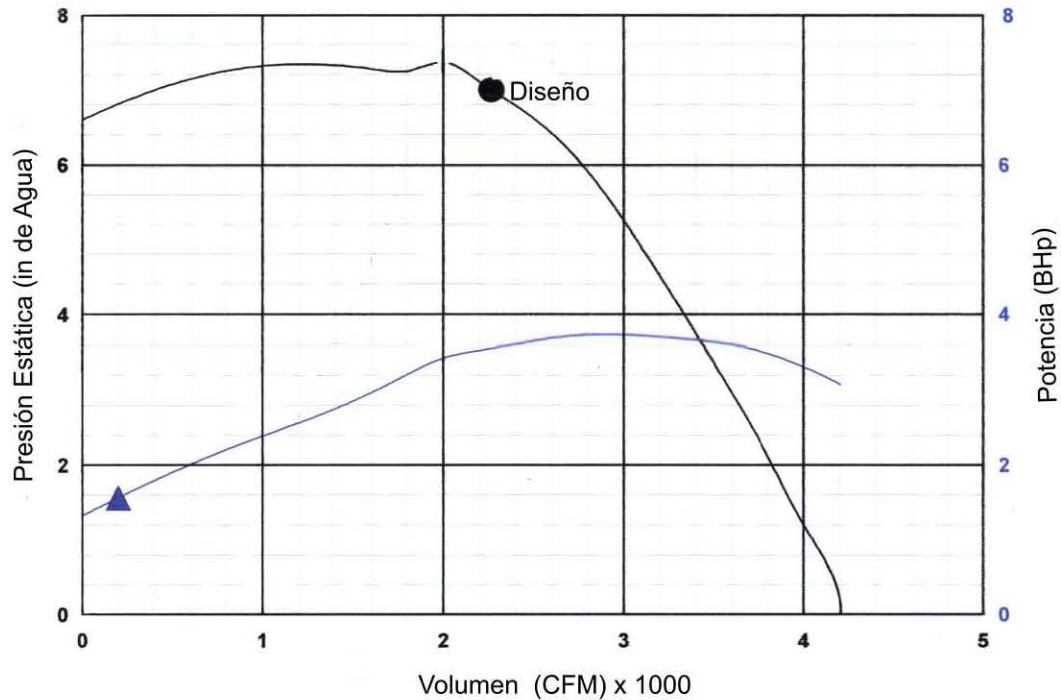
Modelo del Ventilador: 36A SQA SW

Tamaño del ventilador: 12 1/4

| | |
|---|-------|
| Volumen de Aire (CFM) | 2266 |
| Presión Estática (in de agua) | 7 |
| Densidad del Aire (lb/ft ³) | 0.046 |
| Temperatura (°F) | 149 |
| Altitud (ft) | 7939 |
| Velocidad (RPM) | 4279 |
| Potencia Requerida (Hp) | 3.56 |
| Eficiencia Estática (%) | 70.1 |
| Velocidad de salida del aire (ft/min) | 2575 |
| Máxima Velocidad a 149°F (RPM) | |
| RPM máxima (Clase I) | 4046 |
| RPM máxima (Clase II) | 4280 |

● -Diseño

▲ -Potencia vs volumen



Caída de presión en la tubería, para transportar el aire que sale del secador al filtro de lonas a diferentes diámetros:

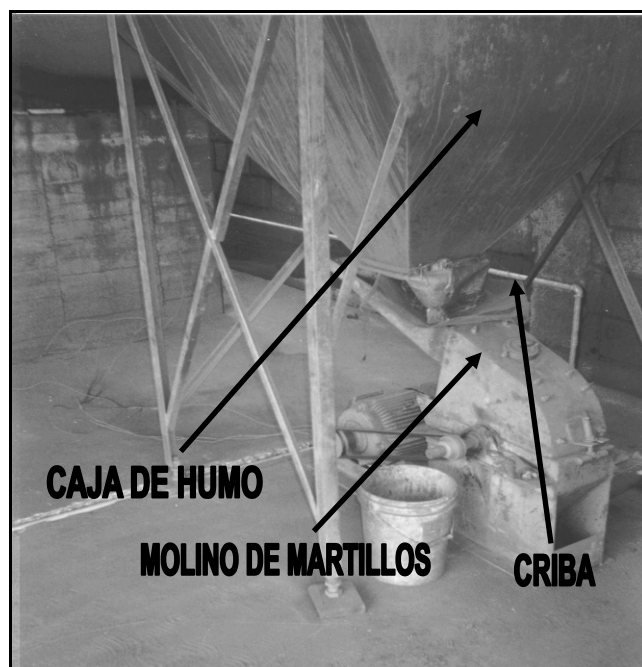
| | |
|-------------------|---|
| 10" diámetro tubo | 1.615 in H ₂ O de caída de presión |
| 12" diámetro tubo | 0.758 in H ₂ O de caída de presión |
| 14" diámetro tubo | 0.401 in H ₂ O de caída de presión |

Utilizamos tubería galvanizada 12" para acondicionamiento de aire, es diámetro comercial y para evitar asentamiento del material dentro de la tubería.

Colocamos un cono inferior a la caja de humo para que el polvo resbale, con una descarga de 20x20cm, saliendo por aquí el polvo seco, el cual pasa inmediatamente por una criba de hierro de 0.5" de agujero para separar impurezas del material.

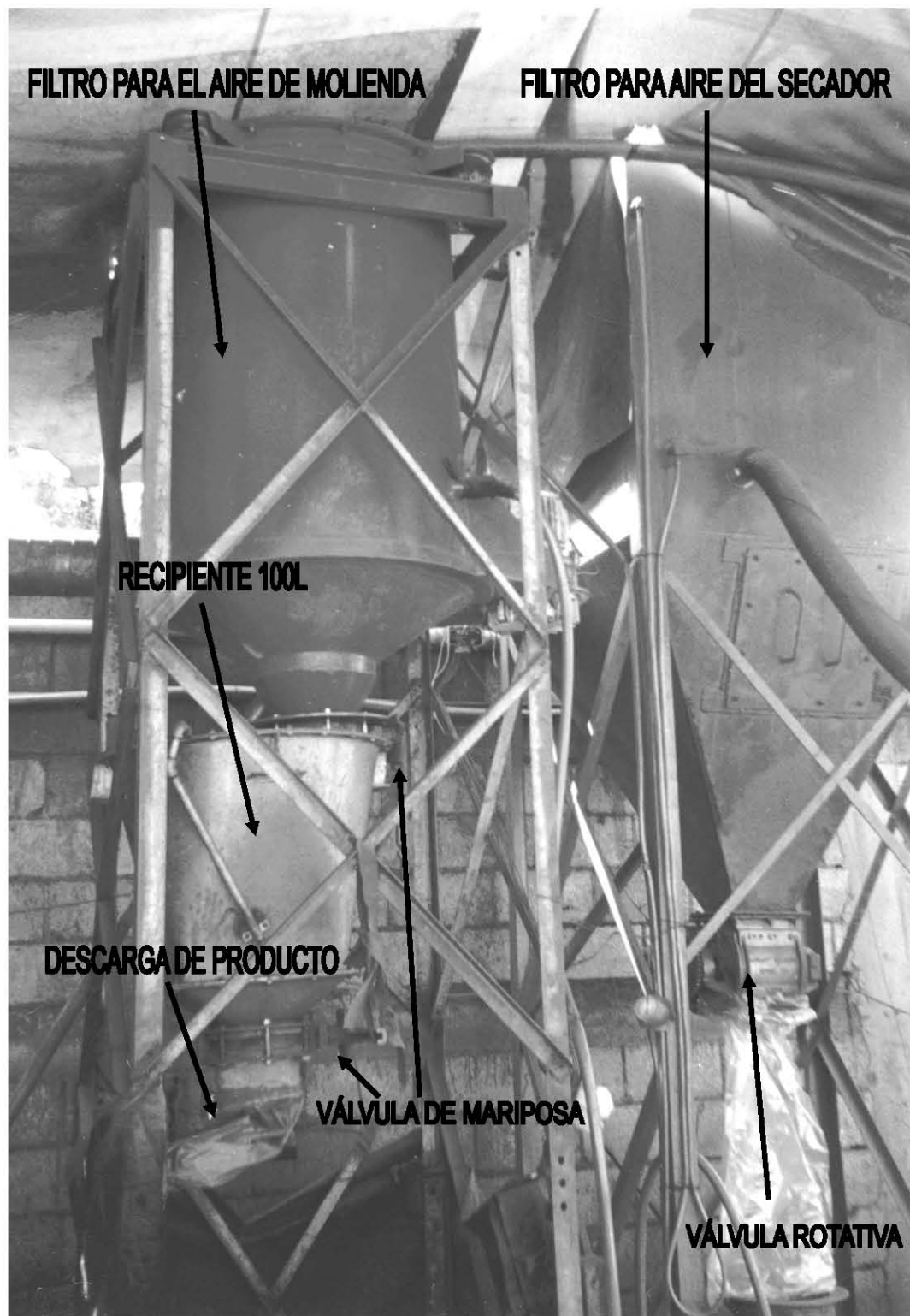
6.5. MOLIENDA Y TRANSPORTE

En la descarga de la caja de humo se colocó un molino de martillos con un motor de 5 Hp que trabaja a 3500 RPM, como se muestra a continuación:



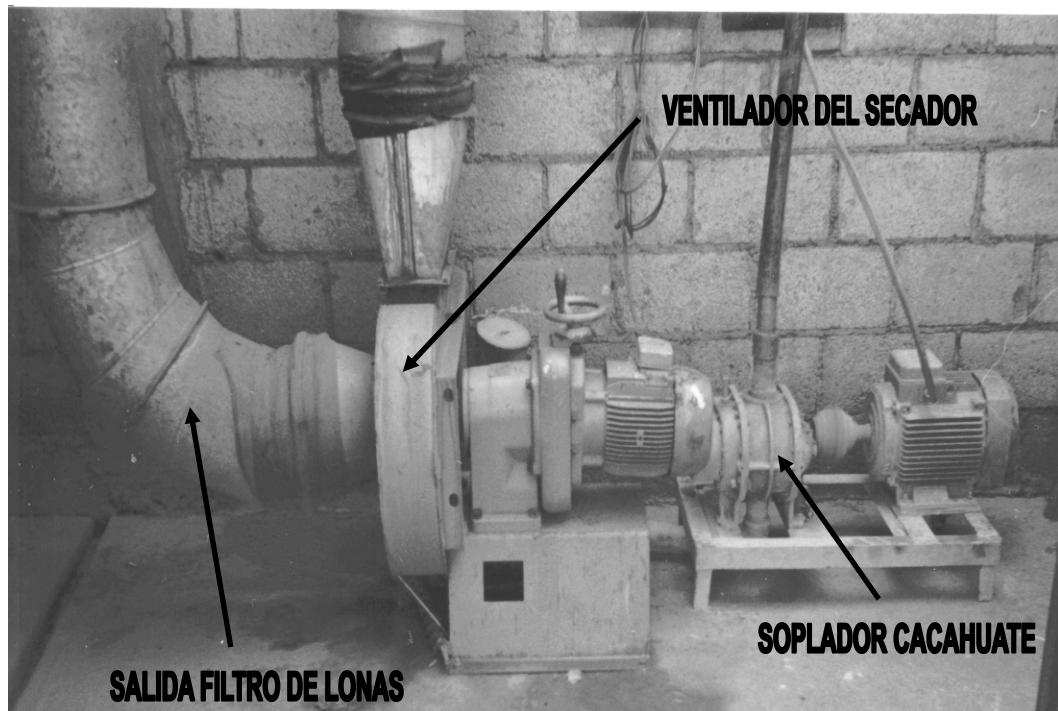
En la parte inferior del molino con un tubo de 2" se extrae el polvo fino que pasó por la malla del molino y después pasa al filtro de lonas del molino donde aquí se separa el producto del aire, el aire que entró por el molino sirvió para transportar el producto, el flujo de este aire se genera por medio de un soplador de cacahuate.

Por debajo del filtro del molino se colocaron dos válvulas de mariposa, entre estas válvulas hay un recipiente de 100 litros, para poder sacar el material cuando el sistema esté trabajando, mientras una válvula esta cerrada la otra está abierta. El sistema trabaja entre 6 y 10 in de agua, como se muestra a continuación:



6.6. FILTRO PARA EL SECADOR

El aire que se extrae del secador pasa a un filtro de lonas para separar el polvo arrastrado por el aire, este flujo de aire es generado por medio de un ventilador mostrado en la siguiente foto.



El fabricante de lonas recomienda la lona MS-201, polipropileno-multifilamento, ligamento SARGA, resistencia trama 255 Kg/5cm, espesor 1.05mm, 25x13 hilos, permeabilidad 254 ft³/min m², para una lona resistente a la tensión y polipropileno resistente a la humedad, por lo que para 2,266 CFM necesitamos un área de :

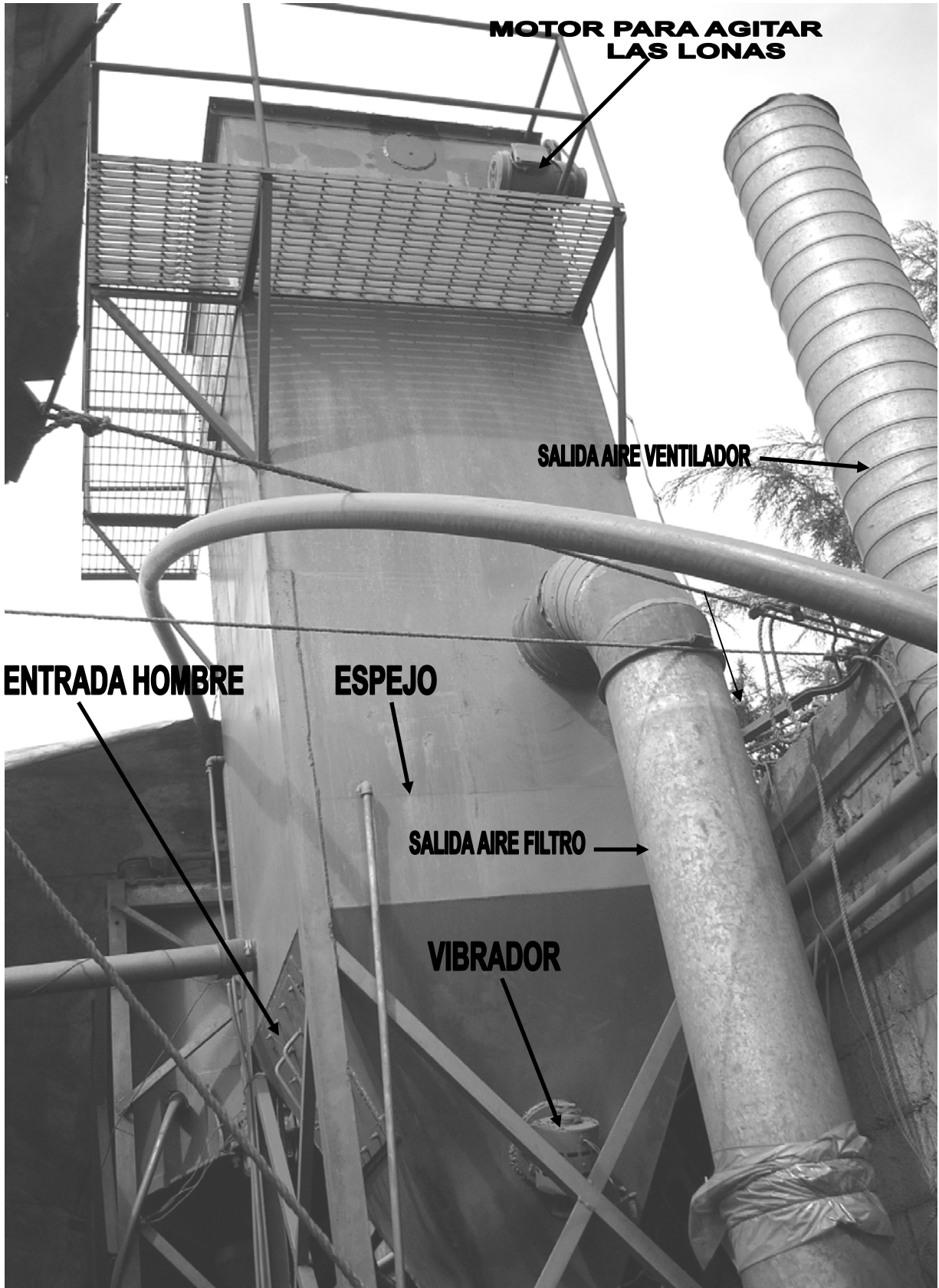
$$\text{Area} = (2,266 \text{ ft}^3/\text{min}) / (254 \text{ ft}^3/\text{min m}^2) = 5.75 \text{ m}^2 \text{ (13)}$$

El filtro de lonas que vemos en la siguiente foto, se hizo con 16 lonas de 22cm de diámetro y 2.4 m de largo obteniendo así una área total de

27m². El cuerpo del filtro se hizo cuadrado de 1.22m X 3.00m de alto, con lamina calibre 12 y un cono de 1.00m de alto en la parte inferior con una válvula rotativa para descargarlo, en la parte superior del filtro se fabricó un sistema de agitación de las lonas para poder despegar el polvo de ellas, con un número de 100 oscilaciones por minuto.⁽¹⁾

Arriba del cono se puede apreciar un cordón de soldadura, a esta altura se encuentra el espejo donde se amarran las 16 lonas de 22 cm de diámetro y 2.4 m de largo, en la parte superior se encuentra una canastilla movable hacia un sentido y donde se amarran las 16 lonas, esta canastilla oscila por medio de un motor de $\frac{3}{4}$ de Hp de 800rpm. Se acopla el motor a un extremo de una flecha de 1" que sale del filtro mediante una banda en B y poleas, en el otro extremo de la flecha que se encuentra en el interior del filtro, se encuentra el extremo desconcéntrico, donde se conecta a la canastilla movable por medio de una biela, la flecha es soportada con chumacera de pared y de piso, en sus extremos.

En la parte inferior del filtro se encuentra una válvula rotativa para poder sacar el polvo sin tener que apagar el sistema.



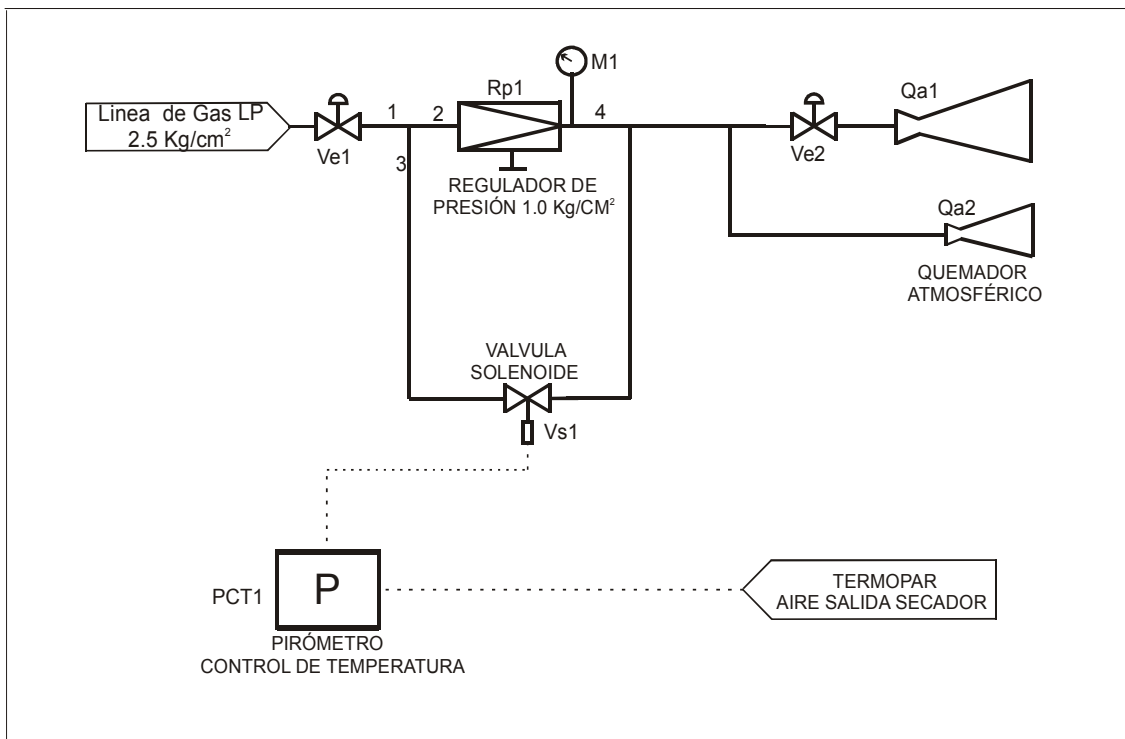
6.7. CONTROL DE TEMPERATURA

El control de temperatura de alta y baja presión es controlado con un pirómetro, como se muestra en el Diagrama No.1. La línea de Gas LP principal de $\frac{3}{4}$ " que viene de un tanque estacionario de 2300L, a una presión de 2.5 Kg/cm^2 , llega a una válvula de esfera (Ve1) que controla el paso del gas, pasando la válvula Ve1, la tubería se separa en dos, por el punto No.2 llega a un regulador de presión con manómetro, para bajar la presión de 2.5 Kg/cm^2 a 1.0 Kg/cm^2 , por aquí pasa el gas cuando los quemadores están funcionando en baja presión, por lo tanto queman menor cantidad de gas, por el punto No.3 pasa el gas con una presión de 2.5 Kg/cm^2 que se controla por una válvula solenoide (Vs1) hacia los quemadores, por aquí pasa el gas cuando los quemadores están funcionando en alta presión. La válvula solenoide (Vs1) es controlada por un pirómetro, la señal que controla al pirómetro viene de un termopar que se encuentra dentro del tubo del aire de salida del secador que va al filtro de lonas, el pirómetro se ajusta a la temperatura deseada, tiene por lo general 5°C de variación, por ejemplo si el pirómetro se ajusta a 65°C , entonces cuando la temperatura del aire de salida del secador baje a 62.5 el relay del pirómetro se cierra y hace que se abra la válvula solenoide y deje pasar el gas de 2.5 Kg/cm^2 , cuando la temperatura del aire de salida del secador llegue 67.5°C el relay del pirómetro se abre y la válvula solenoide se cierra.

Cabe mencionar que el operador debe de controlar la válvula Ve2, por ejemplo el operador se encuentra alimentando al secador a una

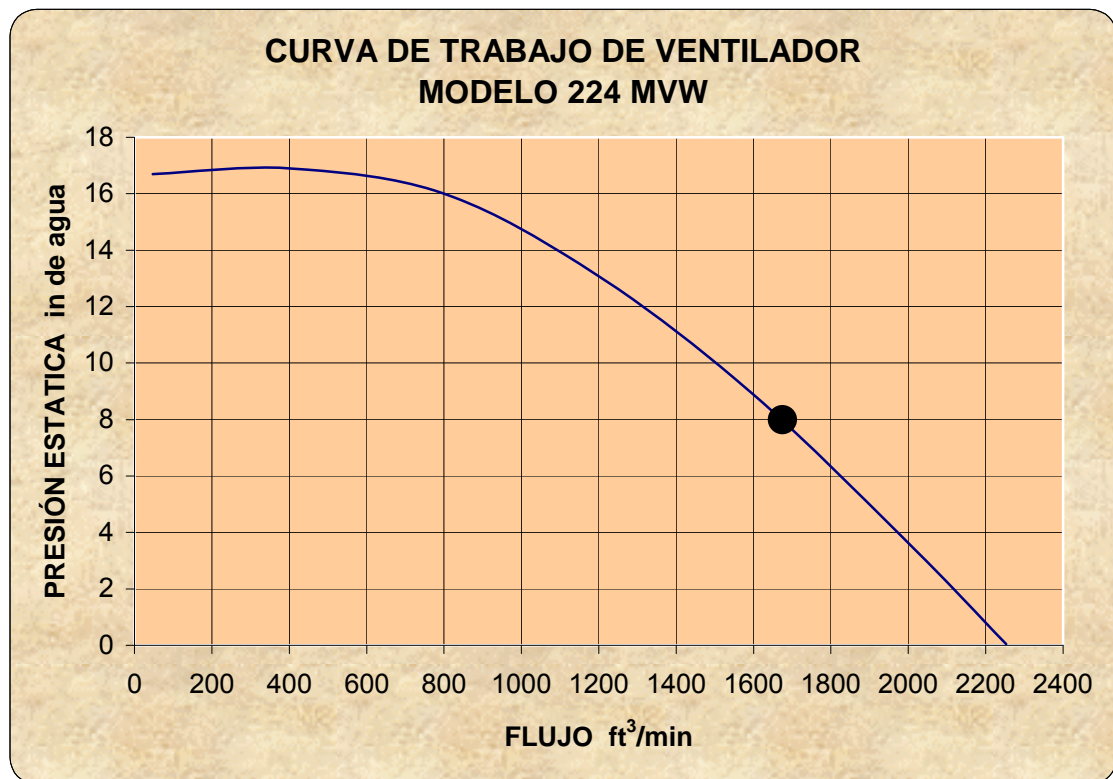
velocidad constante, si el pirómetro se queda en alta presión mucho tiempo, quiere decir que el secador necesita más calor, por lo tanto debe alimentar menos o abrir un poco la llave Ve2, por el contrario si los quemadores se quedan mucho tiempo a baja presión significa que necesita alimentar más material al secador o cerrar un poco la llave Ve2, una vez estabilizado es fácil su control.

DIAGRAMA No.1
CONTROL DE TEMPERATURA DEL SECADOR



7. PRUEBA DE SECADO

El ventilador modelo 36A SQA SW del secador se cambio ya que la caída de presión en el sistema era mayor de 7 in de H₂O. Se colocó un ventilador de alta presión marca TWIN CITY FAN AND BLOWER modelo MBW tamaño 224. La curva de trabajo para este ventilador se representa en la siguiente gráfica:



CFM=1720, RPM=3106, BHP=7.52, densidad=0.047lb/ft³,
altitud=7936 ft, temperatura=65°C.

El material alimentado al secador con humedad inicial de 27.7% base húmeda, fue alimentado constantemente, sin mezclarlo con material seco. En la tabla No. 9 se muestran los datos obtenidos.

TABLA No.9

RESULTADOS DE PRUEBA DE SECADO

| TIEMPO | TEMP SÓLIDO ENTRADA °C | TEMP SÓLIDO SALIDA °C | TBS AMBIENTE °C | TBH AMBIENTE °C | TBS SALIDA AIRE SECADOR °C | TBH SALIDA AIRE SECADOR °C | TBS SALIDA AIRE VENTILADOR °C | TBH SALIDA AIRE VENTILADOR °C | HUMEDAD MATERIAL SECO SALIDA % | PRESIÓN DEL FILTRO LONAS in H2O | FLUJO DE AIRE SALIDA SECADOR ft ³ /min |
|--------------|------------------------|-----------------------|-----------------|-----------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|---|
| 06:30 | 18 | 57 | 19 | 15 | 65 | 46 | 50 | 44 | 1.32 | 3.5 | 1891 |
| 06:40 | 18 | 58 | 19 | 15 | 65 | 47 | 50 | 45 | 1.49 | 3.8 | 1866 |
| 06:50 | 18 | 59 | 19 | 15 | 65 | 48 | 51 | 45 | 1.23 | 4.3 | 1825 |
| 07:00 | 18 | 58 | 19 | 15 | 65 | 48 | 50 | 45 | 1.56 | 5 | 1784 |
| 07:10 | 18 | 58 | 19 | 15 | 65 | 48 | 50 | 46 | 1.09 | 6 | 1702 |
| 07:20 | 18 | 59 | 19 | 15 | 65 | 49 | 50 | 47 | 1.41 | 7.3 | 1616 |
| 07:30 | 18 | 60 | 19 | 15 | 65 | 50 | 49 | 48 | 1.78 | 9 | 1509 |

PRODUCCIÓN 338Kg/Hr MÁS EL MATERIAL QUE SALE DEL FILTRO DE LONAS 398.2 **Kg** **totales**

MATERIAL TOTAL CON LA HUMEDAD DE 1.09% = 398.2 **Kg**

LECTURA DE GAS = 27 **LITROS** tiempo de trabajo 1 hora

HUMEDAD INICIAL DEL MATERIAL A SECAR= 27.70% **BASE HÚMEDA**

CANTIDAD DE MATERIAL SECO AGREGADO= 0 **Kg**

MATERIAL QUE SALE DEL FILTRO DE LONAS= 62.5 **Kg** HUMEDAD= 4.73% **BASE HÚMEDA**

Observamos que después de una hora la humedad del producto aumenta ya que la temperatura de bulbo húmedo y bulbo seco se acercan, debido a que disminuye el flujo de aire.

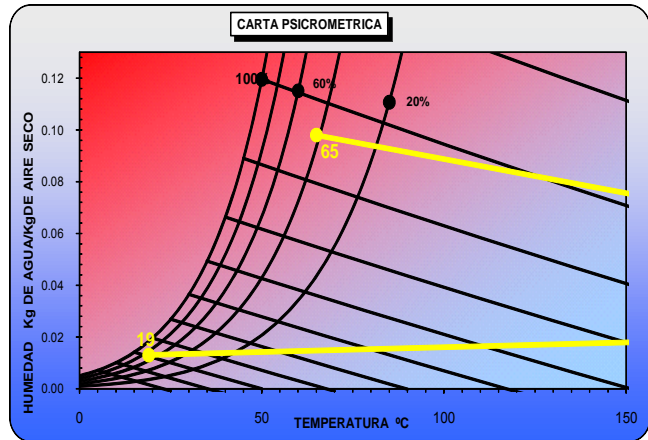
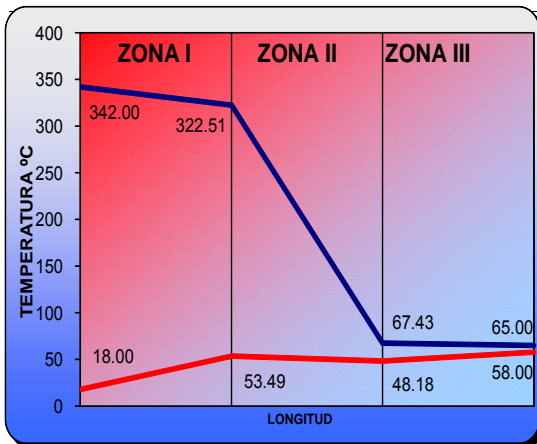
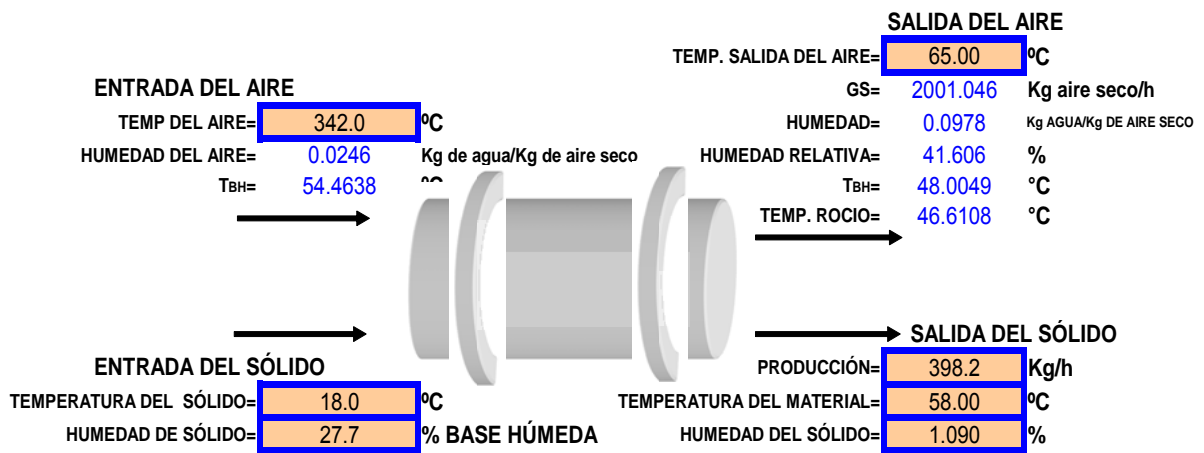
La producción de material seco que se obtuvo del secador fue de 338Kg, la cantidad de material recuperado en el filtro de lonas fue de 62.5 Kg, con una humedad de 4.73% base húmeda. Por lo tanto la producción total de material con una humedad de 1.09% base húmeda fue de 398.2Kg. La cantidad de gas utilizado durante 1 h fue de 27 L.

Los datos que obtuvimos se realizaron en 1 hora, el flujo de aire durante este tiempo fue cambiando, de la tabla No.9 de los resultados de la prueba, observamos que para el tiempo de 7:10 el flujo del aire es aproximadamente el promedio entre el flujo inicial y final, entonces éstos fueron los datos que usamos para el programa.

Para obtener en el programa datos que se acercan a los experimentales es necesario aumentar el espesor del aislante, en este experimento el espesor fue de 0.0396 in. En diferentes pruebas de secado el espesor varía de 0.0351 a 0.0405 in. El consumo de gas LP lo fijamos a 27 L, la temperatura de bulbo húmedo de la salida del secador a 48°C, entonces movemos el espesor del aislante con el fin de que coincida el gas LP y la temperatura de bulbo húmedo de la salida del secador, de esta forma obtenemos el calor perdido por el cuerpo del cilindro, más cercano al real y se obtiene del programa los resultados de la prueba de secado:

DATOS NECESARIOS PARA LA PRUEBA DE SECADO

| | | |
|--|---------|-------------|
| TEMPERATURA AMBIENTE T_{amb} = | 19.0 | °C |
| TEMP. BULBO HÚMEDO DEL AMBIENTE $T_{BH\ amb}$ = | 15.0 | °C |
| PRESIÓN ATMOSFERICA (PT) = | 574.0 | mmHg |
| DIFERENCIA DE TEMPERATURA ENTRE EL GAS SALIDA Y PRODUCTO= | 7.00 | °C |
| ESPESOR DE AISLANTE (LANA MINERAL) DEL SECADOR E_{ais} = | 0.0396 | in |
| DIÁMETRO DEL SECADOR D_s = | 1.040 | M |
| PESOS/ KW DE LUZ= | 2.123 | PESOS/KW |
| PESOS / LITRO DE GAS= | 4.060 | PESOS/LITRO |
| SUELDO POR PERSONA= | 150.000 | PESOS/DÍA |



LONGITUD EN m EN CADA ZONA

| | FRACCIÓN PÉRDIDA DE CALOR | LONGITUD m | % N_{TOG} |
|----------|---------------------------|------------|-------------|
| ZONA I | 0.0476928 | 0.3714403 | 2.639 |
| ZONA II | 0.9390437 | 7.3134393 | 92.492 |
| ZONA III | 0.0132635 | 0.1032982 | 4.869 |

LONGITUD TOTAL = 7.788 m

RESULTADOS DEL PROGRAMA DE LA PRUEBA DE SECADO

| | | | | | |
|--|------------|-------------------------|----------------------------------|-----------------|--------------|
| HUMEDAD DEL AMBIENTE= | 0.0125 | Kg AGUA/Kg DE AIRE SECO | | | |
| Nt _{og} TOTAL = | 1.872 | | longitud para el cálculo= | 9.500 | |
| LONGITUD DEL CUERPO CALCULADO= | 7.788 | m | LONGITUD propuesta p/fabricación | 8.567 | m |
| EVAPORACIÓN= | 146.540 | Kg AGUA/h | | | |
| VELOCIDAD DEL AIRE DENTRO DEL SECADOR= | 534.946 | lb/hr ft ² | 0.726 | Longitud fija = | 9.5 m |
| COSTO DEL GAS LP PARA SECAR= | 0.27497 | PESOS/Kg | | | |
| LITROS DE GAS LP CONSUMIDOS= | 26.969 | L/h | | | |
| VOLUMEN DEL VENTILADOR= | 2932.097 | m ³ /h | velocidad aire = | 0.959 | m/s del aire |
| VOLUMEN DEL VENTILADOR (FCM)= | 1725.767 | ft ³ /min | | 3.452 | Km/h |
| CALOR SUMINISTRADO POR EL QUEMADOR= | 181510.684 | KCAL/h | | | |
| CALOR PERDIDO POR EL CUERPO= | 52605.921 | KCAL/h | | | |
| EFICIENCIA TÉRMICA= | 71.018 | % | | | |
| rpm MÍNIMA= | 4.664 | | | | |
| rpm MÁXIMA= | 9.329 | | | | |

TUBERÍA DE SALIDA DE AIRE DEL SECADOR AL FILTRO

| | | | | |
|---|-----------|---|------------------------------|--------------------|
| DIÁMETRO TUBERÍA DE AIRE SALIDA (D) = | 12.0 | in | | |
| VISCOSIDAD DEL AIRE SALIDA (μ) = | 0.0196 | CENIPOSE | APÉNDICE E | |
| DENSIDAD DEL AIRE SALIDA (ρ) = | 0.757382 | Kg/m ³ | 0.04724 | lb/ft ³ |
| VELOCIDAD DEL AIRE SALIDA (v) = | 11.162 | m/s | | |
| NRE= | 1.315E+05 | | NRE= D v ρ / μ (11) | |
| No. CODOS 90° = | 1.0 | | | |
| COEFICIENTE DE RESISTENCIA (K) = | 2.328 | (11)pag A-49 | | |
| FACTOR DE FRICCIÓN (f)= | 0.0250 | OBTENER DATO | (11)pag A-42 - A-43 | |
| LONGITUD DE TUBERÍA= | 4.0 | m | | |
| ΔP = | 0.6253 | K W ² / (D ⁴ ρ) | (11)pag 3-6 | |
| ΔP = | 0.001 | bar | 0.441 | IN DE AGUA |

8. CONCLUSIONES

Con los datos obtenidos podemos ver claramente que se cumplieron los objetivos, secar un material de óxido de hierro con humedad inicial del 30%, obtener un producto de óxido de hierro molido con una humedad menor del 2% y una producción mayor de 200Kg/h, este objetivo lo rebasamos con una producción de 345Kg/h en promedio.

Antes se utilizaba la energía solar para el secado, la cual es gratis, pero se tenía que transportar el material húmedo a una distancia de 600Km, haciendo un cálculo de gasolina, casetas, viáticos, mano de obra, desgaste del camión, energía eléctrica, se obtuvo un costo aproximado en ambos casos de \$1.00/Kg, en el secador rotatorio se obtuvo un producto con mayor calidad, ya que contiene una humedad más controlada y menor impureza.

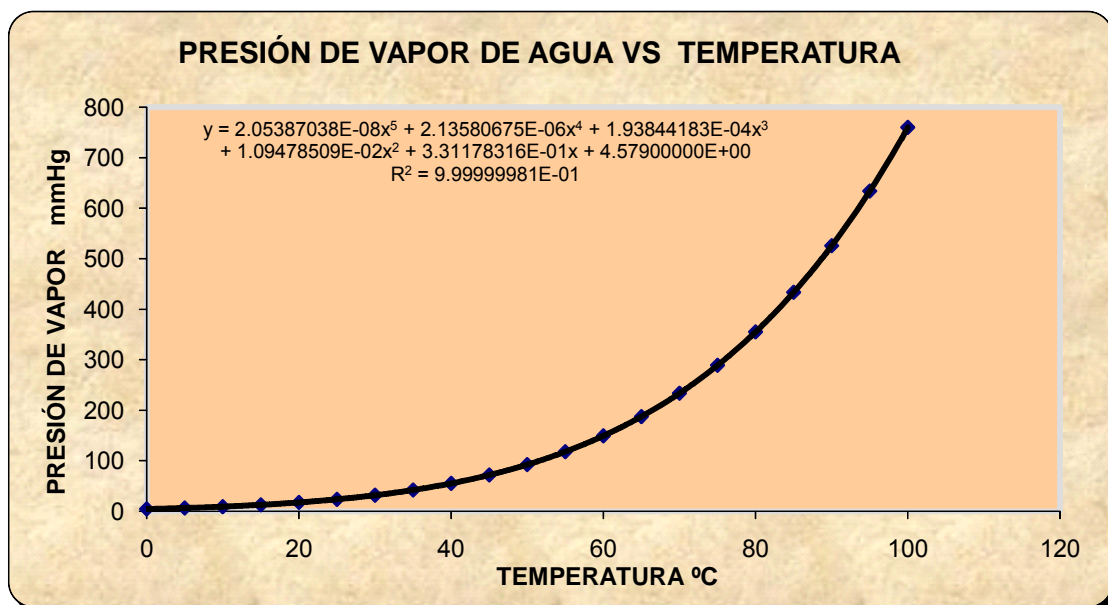
Uno de los problemas que se observaron en la fabricación del secador, es el ventilador y el filtro de lonas, el ventilador debe ser adecuado para manejar el aire necesario, que está en función de la altitud, temperatura del gas y caída de presión en el sistema (tuberías y filtro de lonas), además para que el secador tenga un mejor control, el filtro debe limpiarse durante el secado, para que resulte un proceso continuo, y el producto obtenga una humedad constante.

9. APÉNDICE A

DATOS

| TEMP °C | PRESION DE VAPOR mm de Hg |
|------------|---------------------------------|
| 0 | 4.5790 |
| 5 | 6.5430 |
| 10 | 9.2090 |
| 15 | 12.7880 |
| 20 | 17.5350 |
| 25 | 23.7560 |
| 30 | 31.8240 |
| 35 | 42.1750 |
| 40 | 55.3240 |
| 45 | 71.8800 |
| 50 | 92.5100 |
| 55 | 118.0400 |
| 60 | 149.3800 |
| 65 | 187.5400 |
| 70 | 233.7000 |
| 75 | 289.1000 |
| 80 | 355.1000 |
| 85 | 433.6000 |
| 90 | 525.7600 |
| 95 | 633.9000 |
| 100 | 760.0000 |

(1) PAG.2-49 TABLA 2-5



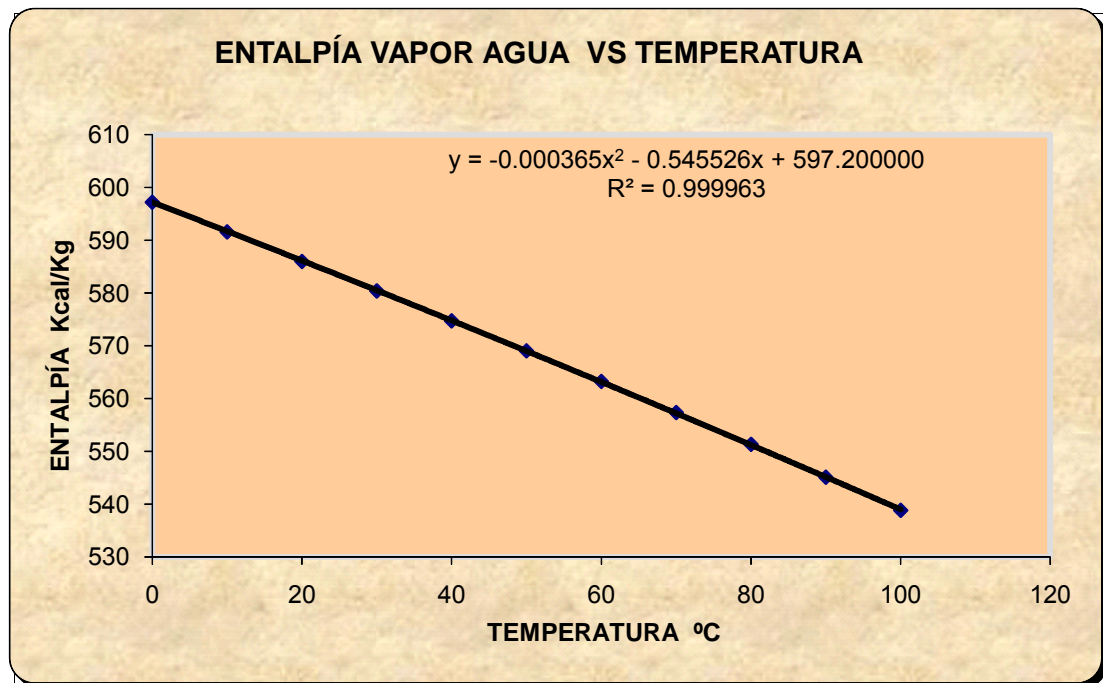
TEMPERATURA = 100.0 °C

10. APÉNDICE B

DATOS

| LANDA | |
|-------------------|---|
| TEMPERATURA °C | ENTALPÍA VAPOR DE AGUA Kcal/Kg |
| 0 | 597.2 |
| 10 | 591.56 |
| 20 | 585.97 |
| 30 | 580.4 |
| 40 | 574.72 |
| 50 | 569.05 |
| 60 | 563.26 |
| 70 | 557.37 |
| 80 | 551.35 |
| 90 | 545.12 |
| 100 | 538.86 |

(3) Pag. 93



y=ENTALPÍA DE VAPOR AGUA Kcal/Kg

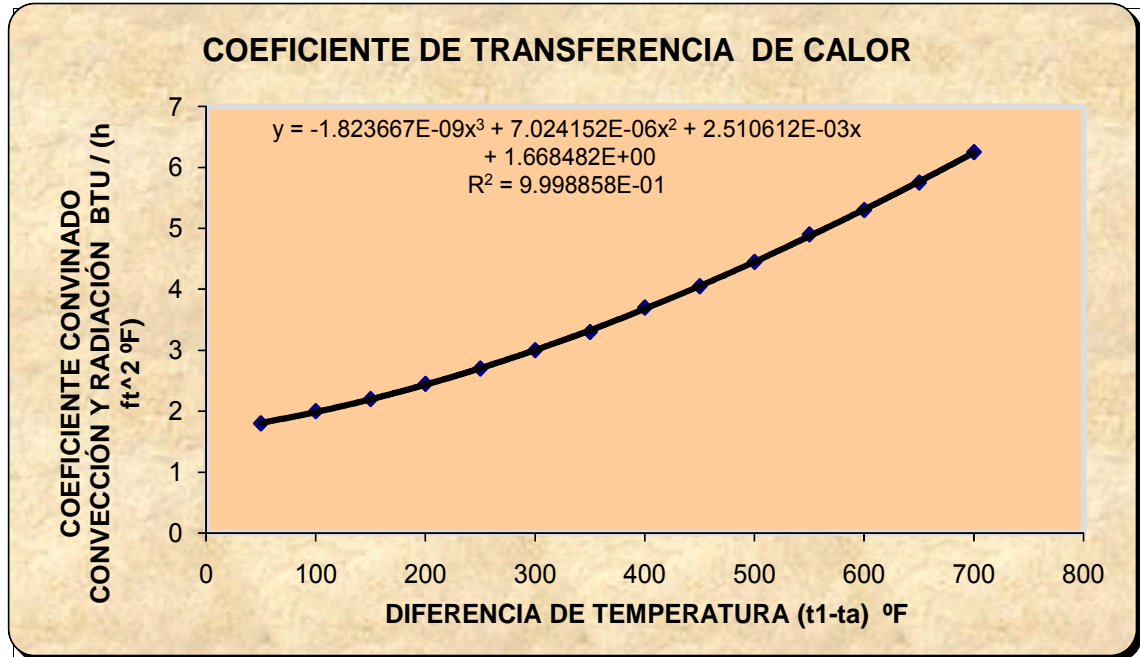
TEMPERATURA = 54.6 °C

ENTALPÍA: 566.3144 Kcal/Kg

11. APÉNDICE C

| temperatura °F | ha BTU/(h ft ² °F) |
|-------------------|----------------------------------|
| 50 | 1.8 |
| 100 | 2 |
| 150 | 2.2 |
| 200 | 2.45 |
| 250 | 2.7 |
| 300 | 3 |
| 350 | 3.3 |
| 400 | 3.7 |
| 450 | 4.05 |
| 500 | 4.45 |
| 550 | 4.9 |
| 600 | 5.3 |
| 650 | 5.75 |
| 700 | 6.25 |

(5) pag 34



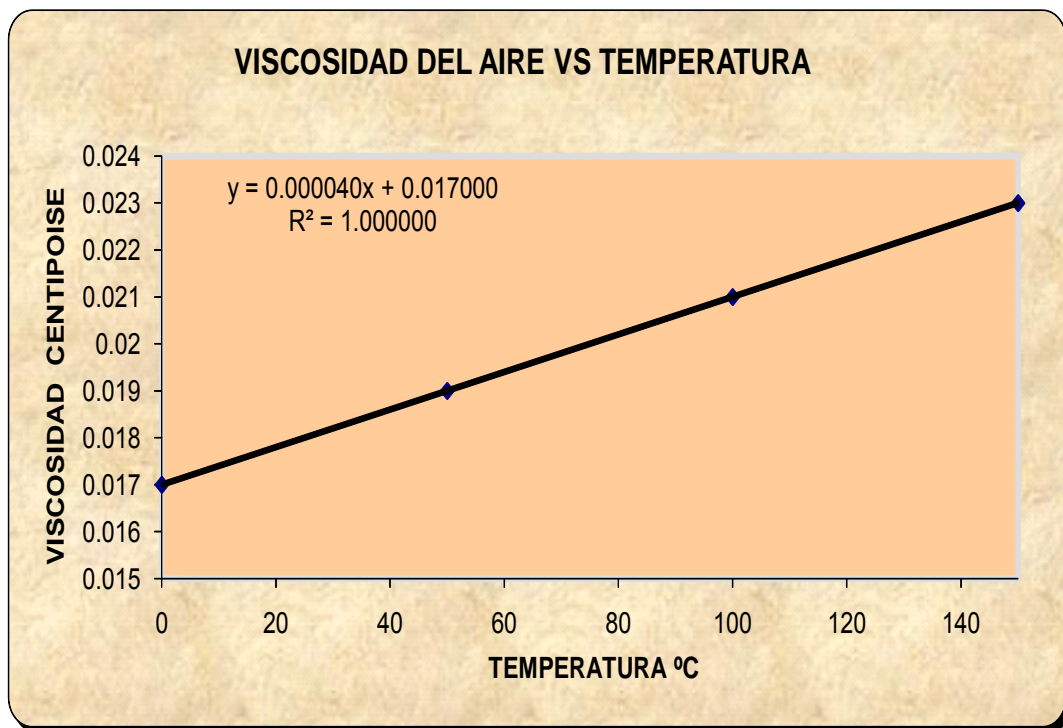
DIFERENCIA TEMPERATURA (t1 ta)= 250.0 ° F

ha = 2.7066497 BTU/(h ft² °F)

12. APÉNDICE D

| TEMPERATURA °C | VISCOSIDAD DEL AIRE CP |
|-------------------|------------------------------|
| 0 | 0.017 |
| 50 | 0.019 |
| 100 | 0.021 |
| 150 | 0.023 |

(5)pag929-930

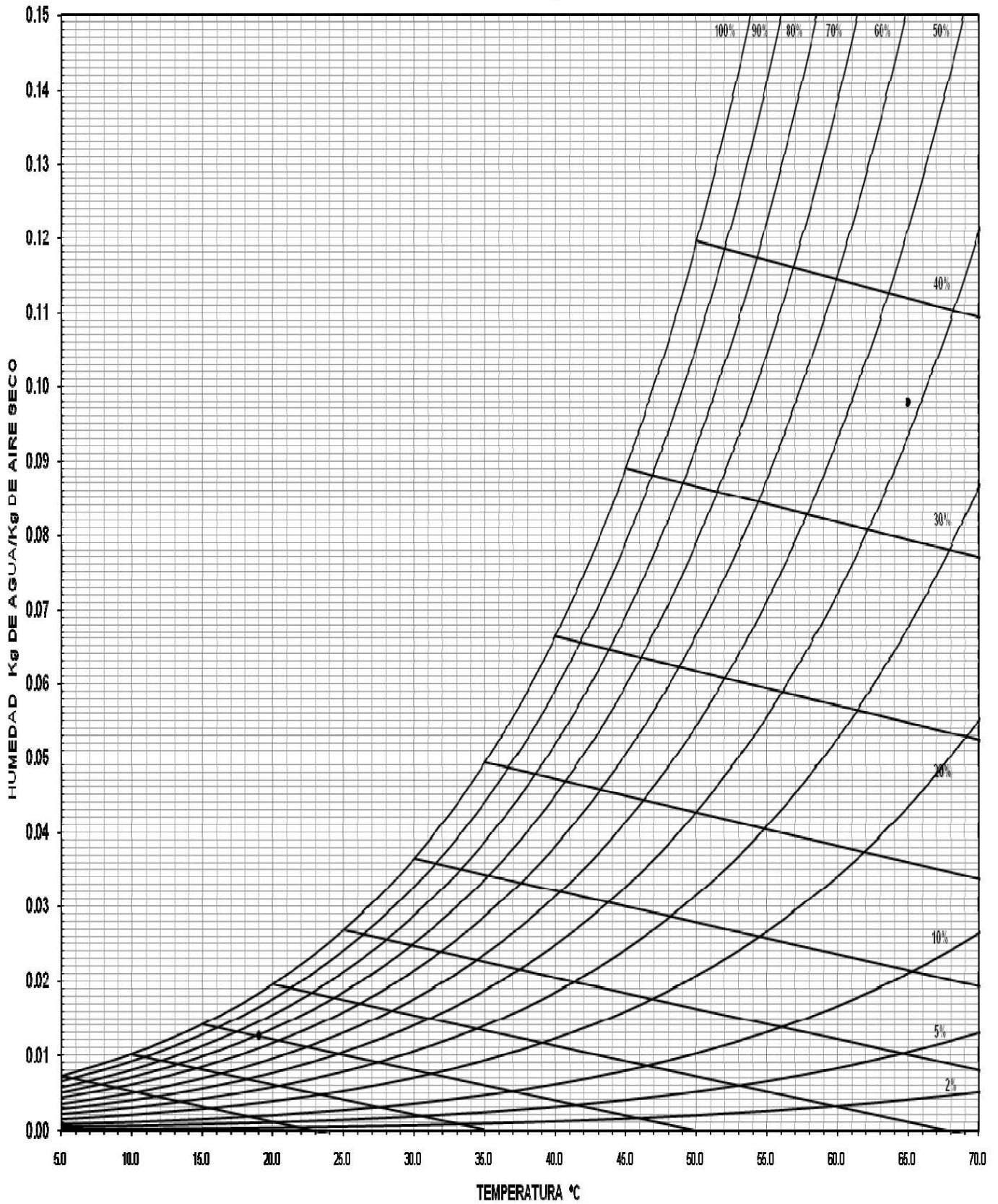


TEMPERATURA= 50.0 °C

VISCOSIDAD = 0.019 CENTIPOISE

13. APÉNDICE E

CARTA PSICROMÉTRICA PRESIÓN = 574 mmHg JILOTEPEC, ESTADO DE MÉXICO



14. BIBLIOGRAFÍA

- 1.- Perry j.,
“MANUAL DEL INGENIERO QUÍMICO”,
Traducción al español 3 era. Edición
Editorial UTEHA
México (1982)

- 2.-Robert E. Traybal
“OPERACIONES DE TRANSFERENCIA DE MASA”
Segunda edición
McGRAW-HILL
México (1987)

- 3.-Antonio Valiente, Rudi Primo Stivalet
“PROBLEMAS DE BALANCES DE ENERGÍA”
Primera edición
Editorial Alambra
México (1982)

- 4.- Antonio Valiente, Rudi Primo Stivalet
“PROBLEMAS DE BALANCES DE MATERIA”
Primera edición
Editorial Alambra
México (1981)

- 5.-Donald Q. Kern
“PROCESOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR”
Decimocuarta impresión
Editorial Continental
México (1980)

- 6.-Pytel, Andrew y Singer, Ferdinand L.
“RESISTENCIA DE MATERIALES”
Editorial Alfaomega
México (1981)
- 7.-Vasant K. Patel
“FRICTION LOSS IN PIPING”
Hydrocarbon Processing
Vol. 63/No.1/100-102
January (1984)
- 8.- Nash, W. A.
“RESISTENCIA DE MATERIALES”
Editorial McGraw-Hill
México (1970)
- 9.-Selmec
“MANUAL DE DATOS TÉCNICOS”
Décima Quinta Edición
México (1992)
- 10.-G. Nonhebel
“EL SECADO DE SÓLIDOS EN LA INDUSTRIA QUÍMICA”
Editorial Reverté
España (1979)
- 11.-Crane
“FLUJO DE FLUIDOS EN VÁLVULAS, ACCESORIOS Y
TUBERÍAS”
Editorial McGRAW-HILL
Edición en Español

12.- Software Selección del ventilador

Chicago Blower

<http://www.chiblo.com/service/software.asp>

13.-Fichas técnicas (FILTRACIÓN)

Industrial Comercial Técnica SA.

<http://www.ict-filtracion.com/principal.php?i=es>

15.- Software Selección del ventilador

TWIN CITY FAN AND BLOWER

<http://www.tcf.com/TCFBlower/index.asp>

1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo fue realizado para una compañía fundada en 1984, dedicada a la elaboración de diversos pigmentos que se utilizan en el ramo de la construcción como: negro de humo, óxido de hierro amarillo, óxido de hierro rojo, café, azul y verde.

Dicha compañía tuvo la necesidad de incrementar la producción de óxido de hierro rojo y el proceso limitante para este propósito es el secado.

En México existen varias empresas dedicadas a la fabricación de secadores, sin embargo los costos para adquirir un equipo de estos, son muy elevados. Después de estudios financieros y tecnológicos de secadores, se llegó a la conclusión que se podía elaborar un secador de fabricación propia.

La compañía contaba en ese momento con una producción de 1,000 kg/semana aproximadamente, y se requería aumentar la producción a 200 Kg/h como mínimo, en un turno de 8 horas, dejando 1 hora para limpieza y arranque, es decir 7,000 kg/semana.

Para construir adecuadamente el secador se tomaron en cuenta ciertos factores:

- Contenido inicial de humedad 30% base húmeda del material.
- Contenido final de humedad máximo 4% del producto.
- Temperatura de secado no mayor de 700°C.
- 200 kg/h de producto seco como mínimo.

- Operación continua debido a que así lo requiere el proceso.
- Proceso siguiente a la desecación: molienda del producto.
- Recuperación de polvos.
- Presión atmosférica de 574 mmHg.

2. OBJETIVO

Seleccionar y construir el secador más adecuado para manejar el mineral Fe_2O_3 , que se pueda adaptar a la continuidad del proceso y generen un producto de las propiedades físicas deseadas.

Secar mineral óxido de hierro con una capacidad de producción de 200 Kg/h, utilizando un material de alto contenido de hierro con una humedad inicial de 30% base húmeda y obtener un material seco con una humedad máxima del 4%.

El proceso de secado debe ser continuo ya que el proceso de molienda así lo requiere.

3. TEORÍA DEL SECADO

El secado de sólidos se refiere a la eliminación o separación de un líquido por conversión en vapor que se separa de un sólido, sin embargo, no se considera como secado la eliminación mecánica de esta humedad o líquido mediante el exprimido o centrifugado⁽²⁾. En este trabajo nos enfocaremos a la eliminación de la humedad del sólido por la evaporación en la superficie en una corriente gaseosa (aire).

3.1. CONTENIDO DE HUMEDAD EN EQUILIBRIO

Supóngase que un sólido húmedo se pone en contacto con una corriente de aire con temperatura y humedad constante y en tal cantidad que las condiciones no varían y que el tiempo de contacto es lo suficientemente largo para que se alcance el equilibrio, en este caso el sólido alcanzará un contenido de humedad definido, que no cambiará con posteriores exposiciones a esta corriente de aire. Este valor se conoce como contenido de humedad de equilibrio del material en las condiciones especificadas.

El contenido de humedad en equilibrio varía con el tipo de material, por ejemplo un sólido insoluble y no poroso tiene un contenido de humedad prácticamente nulo, en lo que se refiere a la masa del sólido, para cualquier humedad y temperatura del aire, por otra parte, ciertos materiales orgánicos de estructura fibrosa o coloidal (madera, papel, tejidos, jabones y cueros) tienen contenidos de humedad de equilibrio que varían regularmente y en

amplias zonas, a medida que la humedad y temperatura del aire con el que están en contacto varía.

Cuando un sólido se deseca ocurren dos procesos fundamentales:

- a) Se transmite calor para evaporar el líquido, este calor puede transmitirse por convección, conducción, radiación o por combinación de estas. Sea cual fuere la modalidad de transmisión de calor, el líquido debe de fluir hacia la superficie expuesta.
- b) La masa se transfiere durante la desecación en forma de líquido o vapor dentro del sólido y como vapor que se desprende en la superficie expuesta. El movimiento de la masa dentro del sólido se debe a un gradiente de concentración de líquido o vapor que depende de las características del sólido.

La transferencia de calor se produce predominantemente por convección o conducción, o ambas, también en todos los secadores se transfiere calor por radiación, sin embargo es raro que éste sea el mecanismo que predomina.

En el caso de secado por convección un gas se sopla sobre la superficie del sólido húmedo proporcionando dos efectos, entregar calor (el coeficiente de transferencia de calor suele ser grande) y eliminar vapor formado.

En el secado por conducción el sólido húmedo se sitúa en un

recipiente calentado externamente, que tiene una salida para eliminar el vapor, generalmente el recipiente se mantiene a presión reducida, con el objeto de aumentar la fuerza impulsora térmica.

En general durante el secado se tiene un mecanismo particular que ejerce control en un lapso dado, dentro del sólido, pero no es extraño encontrar diferentes mecanismos que predominan en tiempos distintos durante el ciclo de secado.

3.2. CONDICIONES EXTERNAS COMPRENDIDAS EN EL ESTUDIO DE SECADO

- Temperatura (aire y sólido)
- Humedad (aire y sólido)
- Estado de subdivisión del sólido
- Corriente de aire (flujo)
- Movimiento del sólido
- Método de sustentación del sólido
- El contacto entre las superficies calientes del sólido mojado.

3.3. PERIODO DE SECADO

Cuando un sólido se seca experimentalmente, casi siempre se obtienen datos que asocian el contenido de humedad con el tiempo, estos datos experimentales se encuentran en las tablas 1, 2 y 3, corresponden a

0.5cm, 1cm y 2cm de espesor del material a secar respectivamente, se obtuvieron haciendo 3 corridas de secado de material húmedo variando el espesor, manteniendo constante el área expuesta, temperatura del aire, humedad del aire y flujo del aire sobre el material. Estos datos se representan gráficamente como el contenido de humedad base seca (W) en función del tiempo, como se muestra en las gráficas 1A, 1B y 1C, estas curvas representan en caso general que los sólidos mojados pierden humedad, primero por evaporación, debido a una superficie saturada del sólido, a lo cual sigue un periodo de evaporación de la superficie no saturada y por último cuando el agua se evapora del interior del sólido.⁽¹⁾

La velocidad de desecación está sujeta a la variación de la humedad en función de tiempo o al contenido de humedad, la variación es más clara haciendo una representación gráfica de dW/dt en función del contenido de humedad base seca (W), gráficas 2A, 2B y 2C, y haciendo otra gráfica dW/dt en función del tiempo, gráficas 3A, 3B y 3C.

TABLA 1

DATOS DE SECADO DE Fe₂O₃ ESPESOR 0.5 CM

CONDICIONES DEL AIRE TBS=64°C Y TBH=25°C, Presión atmosférica 574 mm de Hg

Diámetro de superficie a secar 9.7CM

| LECTURA | TIEMPO MINUTOS | PESO DE LA MUESTRA GRAMOS | PESO MENOS TARA | DIFERENCIA DE PESO | CANTIDAD AGUA | CONTENIDO DE HUMEDAD BASE SECA | DIFERENCIA DE TIEMPO | dw/dt |
|-----------|-------------------|------------------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------|--------------------------------------|-------------------------|-------------|
| 1 | 0 | 71.10 | 65.85 | | 26.50 | 0.6760 | | |
| 2 | 5 | 69.75 | 64.50 | 1.35 | 25.35 | 0.6467 | 5 | 0.27 |
| 3 | 10 | 68.35 | 63.10 | 1.40 | 23.95 | 0.6110 | 5 | 0.28 |
| 4 | 15 | 66.95 | 61.70 | 1.40 | 22.55 | 0.5753 | 5 | 0.28 |
| 5 | 20 | 65.55 | 60.30 | 1.40 | 21.15 | 0.5395 | 5 | 0.28 |
| 6 | 25 | 64.15 | 58.90 | 1.40 | 19.75 | 0.5038 | 5 | 0.28 |
| 7 | 30 | 62.75 | 57.50 | 1.40 | 18.35 | 0.4681 | 5 | 0.28 |
| 8 | 35 | 61.35 | 56.10 | 1.40 | 16.95 | 0.4324 | 5 | 0.28 |
| 9 | 40 | 59.95 | 54.70 | 1.40 | 15.55 | 0.3967 | 5 | 0.28 |
| 10 | 45 | 58.55 | 53.30 | 1.40 | 14.15 | 0.3610 | 5 | 0.28 |
| 11 | 50 | 57.15 | 51.90 | 1.40 | 12.75 | 0.3253 | 5 | 0.28 |
| 12 | 55 | 55.75 | 50.50 | 1.40 | 11.35 | 0.2895 | 5 | 0.28 |
| 13 | 60 | 54.35 | 49.10 | 1.40 | 9.95 | 0.2538 | 5 | 0.28 |
| 14 | 65 | 52.95 | 47.70 | 1.40 | 8.55 | 0.2181 | 5 | 0.28 |
| 15 | 70 | 51.55 | 46.30 | 1.40 | 7.15 | 0.1824 | 5 | 0.28 |
| 16 | 75 | 50.15 | 44.90 | 1.40 | 5.75 | 0.1467 | 5 | 0.28 |
| 17 | 80 | 48.95 | 43.70 | 1.20 | 4.55 | 0.1161 | 5 | 0.24 |
| 18 | 85 | 48.10 | 42.85 | 0.85 | 3.70 | 0.0944 | 5 | 0.17 |
| 19 | 90 | 47.50 | 42.25 | 0.60 | 3.10 | 0.0791 | 5 | 0.12 |
| 20 | 95 | 47.00 | 41.75 | 0.50 | 2.60 | 0.0663 | 5 | 0.10 |
| 21 | 100 | 46.55 | 41.30 | 0.45 | 2.15 | 0.0548 | 5 | 0.09 |
| 22 | 105 | 46.20 | 40.95 | 0.35 | 1.80 | 0.0459 | 5 | 0.07 |
| 23 | 110 | 45.90 | 40.65 | 0.30 | 1.50 | 0.0383 | 5 | 0.06 |
| 24 | 115 | 45.65 | 40.40 | 0.25 | 1.25 | 0.0319 | 5 | 0.05 |
| 25 | 120 | 45.40 | 40.15 | 0.25 | 1.00 | 0.0255 | 5 | 0.05 |
| 26 | 125 | 45.20 | 39.95 | 0.20 | 0.80 | 0.0204 | 5 | 0.04 |
| 27 | 130 | 45.05 | 39.80 | 0.15 | 0.65 | 0.0166 | | |

Peso final del recipiente cortado a 0.5 cm más el material = 45.05g

Se terminó de secar en un horno a 200°C para medir la humedad final, material a secar 39.8g
material seco 39.2g

Agua que había quedado 0.6g entonces tenía al final =0.015306122 g de agua / g de sólido seco
tara = 5.25 g humedad base seca = 1.53%

TABLA 2

DATOS DE SECADO DE Fe₂O₃ ESPESOR 1.0 CM

CONDICIONES DEL AIRE TBS=64°C Y TBH=25°C, Presión atmosférica 574 mm de Hg
Diámetro de superficie a secar 9.7cm

| LECTURA | TIEMPO minutos | PESO DE LA MUESTRA gr | PESO | DIFERENCIA DE PESO | CANTIDAD AGUA | CONTENIDO DE HUMEDAD BASE SECA | DIFERENCIA DE TIEMPO | dw/dt |
|-----------|-------------------|--------------------------------|---------------|-----------------------|------------------|---|-------------------------|-------------|
| | | | MENOS TARA | | | | | |
| 1 | 0 | 158.90 | 116.25 | | 46.85 | 0.6751 | | |
| 2 | 5 | 157.60 | 114.95 | 1.30 | 45.55 | 0.6563 | 5 | 0.26 |
| 3 | 10 | 156.20 | 113.55 | 1.40 | 44.15 | 0.6362 | 5 | 0.28 |
| 4 | 15 | 154.70 | 112.05 | 1.50 | 42.65 | 0.6146 | 5 | 0.30 |
| 5 | 20 | 153.00 | 110.35 | 1.70 | 40.95 | 0.5901 | 5 | 0.34 |
| 6 | 25 | 151.30 | 108.65 | 1.70 | 39.25 | 0.5656 | 5 | 0.34 |
| 7 | 30 | 149.60 | 106.95 | 1.70 | 37.55 | 0.5411 | 5 | 0.34 |
| 8 | 35 | 147.90 | 105.25 | 1.70 | 35.85 | 0.5166 | 5 | 0.34 |
| 9 | 40 | 146.20 | 103.55 | 1.70 | 34.15 | 0.4921 | 5 | 0.34 |
| 10 | 45 | 144.50 | 101.85 | 1.70 | 32.45 | 0.4676 | 5 | 0.34 |
| 11 | 50 | 142.80 | 100.15 | 1.70 | 30.75 | 0.4431 | 5 | 0.34 |
| 12 | 55 | 141.10 | 98.45 | 1.70 | 29.05 | 0.4186 | 5 | 0.34 |
| 13 | 60 | 139.40 | 96.75 | 1.70 | 27.35 | 0.3941 | 5 | 0.34 |
| 14 | 65 | 137.70 | 95.05 | 1.70 | 25.65 | 0.3696 | 5 | 0.34 |
| 15 | 70 | 136.00 | 93.35 | 1.70 | 23.95 | 0.3451 | 5 | 0.34 |
| 16 | 75 | 134.30 | 91.65 | 1.70 | 22.25 | 0.3206 | 5 | 0.34 |
| 17 | 80 | 132.60 | 89.95 | 1.70 | 20.55 | 0.2961 | 5 | 0.34 |
| 18 | 85 | 130.90 | 88.25 | 1.70 | 18.85 | 0.2716 | 5 | 0.34 |
| 19 | 90 | 129.20 | 86.55 | 1.70 | 17.15 | 0.2471 | 5 | 0.34 |
| 20 | 95 | 127.50 | 84.85 | 1.70 | 15.45 | 0.2226 | 5 | 0.34 |
| 21 | 100 | 125.90 | 83.25 | 1.60 | 13.85 | 0.1996 | 5 | 0.32 |
| 22 | 105 | 124.50 | 81.85 | 1.40 | 12.45 | 0.1794 | 5 | 0.28 |
| 23 | 110 | 123.30 | 80.65 | 1.20 | 11.25 | 0.1621 | 5 | 0.24 |
| 24 | 115 | 122.15 | 79.50 | 1.15 | 10.10 | 0.1455 | 5 | 0.23 |
| 25 | 120 | 121.15 | 78.50 | 1.00 | 9.10 | 0.1311 | 5 | 0.20 |
| 26 | 125 | 120.25 | 77.60 | 0.90 | 8.20 | 0.1182 | 5 | 0.18 |
| 27 | 130 | 119.50 | 76.85 | 0.75 | 7.45 | 0.1073 | 5 | 0.15 |
| 28 | 135 | 118.80 | 76.15 | 0.70 | 6.75 | 0.0973 | 5 | 0.14 |
| 29 | 140 | 118.10 | 75.45 | 0.70 | 6.05 | 0.0872 | 5 | 0.14 |
| 30 | 145 | 117.55 | 74.90 | 0.55 | 5.50 | 0.0793 | 5 | 0.11 |
| 31 | 150 | 117.05 | 74.40 | 0.50 | 5.00 | 0.0720 | 5 | 0.10 |
| 32 | 155 | 116.60 | 73.95 | 0.45 | 4.55 | 0.0656 | 5 | 0.09 |
| 33 | 160 | 116.20 | 73.55 | 0.40 | 4.15 | 0.0598 | 5 | 0.08 |
| 34 | 165 | 115.80 | 73.15 | 0.40 | 3.75 | 0.0540 | 5 | 0.08 |
| 35 | 170 | 115.45 | 72.80 | 0.35 | 3.40 | 0.0490 | 5 | 0.07 |
| 36 | 175 | 115.10 | 72.45 | 0.35 | 3.05 | 0.0439 | 5 | 0.07 |
| 37 | 180 | 114.80 | 72.15 | 0.30 | 2.75 | 0.0396 | 5 | 0.06 |
| 38 | 185 | 114.60 | 71.95 | 0.20 | 2.55 | 0.0367 | 5 | 0.04 |
| 39 | 190 | 114.40 | 71.75 | 0.20 | 2.35 | 0.0339 | 5 | 0.04 |

CONTINUA TABLA 2

| LECTURA | TIEMPO minutos | PESO DE LA MUESTRA gr | PESO MENOS TARA | DIFERENCIA DE PESO | CANTIDAD AGUA | CONTENIDO DE HUMEDAD BASE SECA | DIFERENCIA DE TIEMPO | dw/dt |
|---------|-------------------|--------------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------|---|-------------------------|-------|
| 40 | 195 | 114.20 | 71.55 | 0.20 | 2.15 | 0.0310 | 5 | 0.04 |
| 41 | 200 | 114.00 | 71.35 | 0.20 | 1.95 | 0.0281 | 5 | 0.04 |
| 42 | 205 | 113.85 | 71.20 | 0.15 | 1.80 | 0.0259 | 5 | 0.03 |
| 43 | 210 | 113.70 | 71.05 | 0.15 | 1.65 | 0.0238 | 5 | 0.03 |
| 44 | 215 | 113.55 | 70.90 | 0.15 | 1.50 | 0.0216 | 5 | 0.03 |
| 45 | 220 | 113.40 | 70.75 | 0.15 | 1.35 | 0.0195 | 5 | 0.03 |
| 46 | 225 | 113.30 | 70.65 | 0.10 | 1.25 | 0.0180 | 5 | 0.02 |
| 47 | 230 | 113.20 | 70.55 | 0.10 | 1.15 | 0.0166 | 5 | 0.02 |
| 48 | 235 | 113.10 | 70.45 | 0.10 | 1.05 | 0.0151 | 5 | 0.02 |
| 49 | 240 | 113.00 | 70.35 | 0.10 | 0.95 | 0.0137 | 5 | 0.02 |
| 50 | 245 | 112.90 | 70.25 | 0.10 | 0.85 | 0.0122 | 5 | 0.02 |
| 51 | 250 | 112.80 | 70.15 | 0.10 | 0.75 | 0.0108 | 5 | 0.02 |
| 52 | 255 | 112.75 | 70.10 | 0.05 | 0.70 | 0.0101 | 5 | 0.01 |
| 53 | 260 | 112.70 | 70.05 | 0.05 | 0.65 | 0.0094 | 5 | 0.01 |
| 54 | 265 | 112.65 | 70.00 | 0.05 | 0.60 | 0.0086 | | |

Peso final del recipiente cortado a 1 cm más el material = 112.65g

Se terminó de secar en un horno a 200°C para medir la humedad final, material a secar = 70g

MATERIAL SECO = 69.4g

Agua que había quedado 0.6g, entonces tenía al final = 0.008645533 g de agua / g de sólido seco

TARA = 42.65g humedad base seca = 0.86%

TABLA 3

DATOS DE SECADO DE Fe₂O₃ ESPESOR DE 2.0 cm

AIRE TBS=64°C Y TBH=25°C, Presión atmosférica 574 mm de Hg
Diámetro de superficie a secar 9.7 cm

| LECTURA | TIEMPO MINUTOS | PESO DE LA MUESTRA | PESO MENOS TARA | DIFERENCIA DE PESO | CANTIDAD AGUA | CONTENIDO DE HUMEDAD BASE SECA | DIFERENCIA DE TIEMPO | dw/dt |
|-----------|-------------------|--------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------|---|-------------------------|-------------|
| 1 | 0 | 277.70 | 242.30 | | 97.65 | 0.6751 | | |
| 2 | 5 | 276.40 | 241.00 | 1.30 | 96.35 | 0.6661 | 5 | 0.26 |
| 3 | 10 | 275.00 | 239.60 | 1.40 | 94.95 | 0.6564 | 5 | 0.28 |
| 4 | 15 | 273.50 | 238.10 | 1.50 | 93.45 | 0.6460 | 5 | 0.30 |
| 5 | 20 | 271.70 | 236.30 | 1.80 | 91.65 | 0.6336 | 5 | 0.36 |
| 6 | 25 | 269.90 | 234.50 | 1.80 | 89.85 | 0.6212 | 5 | 0.36 |
| 7 | 30 | 268.10 | 232.70 | 1.80 | 88.05 | 0.6087 | 5 | 0.36 |
| 8 | 35 | 266.30 | 230.90 | 1.80 | 86.25 | 0.5963 | 5 | 0.36 |
| 9 | 40 | 264.50 | 229.10 | 1.80 | 84.45 | 0.5838 | 5 | 0.36 |
| 10 | 45 | 262.70 | 227.30 | 1.80 | 82.65 | 0.5714 | 5 | 0.36 |
| 11 | 50 | 260.90 | 225.50 | 1.80 | 80.85 | 0.5589 | 5 | 0.36 |
| 12 | 55 | 259.10 | 223.70 | 1.80 | 79.05 | 0.5465 | 5 | 0.36 |
| 13 | 60 | 257.30 | 221.90 | 1.80 | 77.25 | 0.5340 | 5 | 0.36 |
| 14 | 65 | 255.50 | 220.10 | 1.80 | 75.45 | 0.5216 | 5 | 0.36 |
| 15 | 70 | 253.70 | 218.30 | 1.80 | 73.65 | 0.5092 | 5 | 0.36 |
| 16 | 75 | 251.90 | 216.50 | 1.80 | 71.85 | 0.4967 | 5 | 0.36 |
| 17 | 80 | 250.10 | 214.70 | 1.80 | 70.05 | 0.4843 | 5 | 0.36 |
| 18 | 85 | 248.30 | 212.90 | 1.80 | 68.25 | 0.4718 | 5 | 0.36 |
| 19 | 90 | 246.50 | 211.10 | 1.80 | 66.45 | 0.4594 | 5 | 0.36 |
| 20 | 95 | 244.70 | 209.30 | 1.80 | 64.65 | 0.4469 | 5 | 0.36 |
| 21 | 100 | 242.90 | 207.50 | 1.80 | 62.85 | 0.4345 | 5 | 0.36 |
| 22 | 105 | 241.10 | 205.70 | 1.80 | 61.05 | 0.4221 | 5 | 0.36 |
| 23 | 110 | 239.30 | 203.90 | 1.80 | 59.25 | 0.4096 | 5 | 0.36 |
| 24 | 115 | 237.60 | 202.20 | 1.70 | 57.55 | 0.3979 | 5 | 0.34 |
| 25 | 120 | 235.90 | 200.50 | 1.70 | 55.85 | 0.3861 | 5 | 0.34 |
| 26 | 125 | 234.20 | 198.80 | 1.70 | 54.15 | 0.3744 | 5 | 0.34 |
| 27 | 130 | 232.50 | 197.10 | 1.70 | 52.45 | 0.3626 | 5 | 0.34 |
| 28 | 135 | 230.80 | 195.40 | 1.70 | 50.75 | 0.3508 | 5 | 0.34 |
| 29 | 140 | 229.10 | 193.70 | 1.70 | 49.05 | 0.3391 | 5 | 0.34 |
| 30 | 145 | 227.40 | 192.00 | 1.70 | 47.35 | 0.3273 | 5 | 0.34 |
| 31 | 150 | 225.70 | 190.30 | 1.70 | 45.65 | 0.3156 | 5 | 0.34 |
| 32 | 155 | 224.00 | 188.60 | 1.70 | 43.95 | 0.3038 | 5 | 0.34 |
| 33 | 160 | 222.30 | 186.90 | 1.70 | 42.25 | 0.2921 | 5 | 0.34 |
| 34 | 165 | 220.60 | 185.20 | 1.70 | 40.55 | 0.2803 | 5 | 0.34 |
| 35 | 170 | 219.00 | 183.60 | 1.60 | 38.95 | 0.2693 | 5 | 0.32 |
| 36 | 175 | 217.40 | 182.00 | 1.60 | 37.35 | 0.2582 | 5 | 0.32 |
| 37 | 180 | 215.85 | 180.45 | 1.55 | 35.80 | 0.2475 | 5 | 0.31 |
| 38 | 185 | 214.30 | 178.90 | 1.55 | 34.25 | 0.2368 | 5 | 0.31 |
| 39 | 190 | 212.90 | 177.50 | 1.40 | 32.85 | 0.2271 | 5 | 0.28 |

CONTINUA TABLA 3

| LECTURA | TIEMPO MINUTOS | PESO DE LA MUESTRA | PESO MENOS TARA | DIFERENCIA | CANTIDAD | CONTENIDO DE HUMEDAD | DIFERENCIA | dw/dt |
|---------|-------------------|--------------------------|-----------------------|------------|----------|----------------------------|------------|-------|
| | | | | DE PESO | AGUA | BASE SECA | DE TIEMPO | |
| 40 | 195 | 211.50 | 176.10 | 1.40 | 31.45 | 0.2174 | 5 | 0.28 |
| 41 | 200 | 210.15 | 174.75 | 1.35 | 30.10 | 0.2081 | 5 | 0.27 |
| 42 | 205 | 208.90 | 173.50 | 1.25 | 28.85 | 0.1994 | 5 | 0.25 |
| 43 | 210 | 207.75 | 172.35 | 1.15 | 27.70 | 0.19 | 5 | 0.23 |
| 44 | 215 | 206.65 | 171.25 | 1.10 | 26.60 | 0.1839 | 5 | 0.22 |
| 45 | 220 | 205.55 | 170.15 | 1.10 | 25.50 | 0.1763 | 5 | 0.22 |
| 46 | 225 | 204.50 | 169.10 | 1.05 | 24.45 | 0.1690 | 5 | 0.21 |
| 47 | 230 | 203.55 | 168.15 | 0.95 | 23.50 | 0.1625 | 5 | 0.19 |
| 48 | 235 | 202.75 | 167.35 | 0.80 | 22.70 | 0.1569 | 5 | 0.16 |
| 49 | 240 | 201.95 | 166.55 | 0.80 | 21.90 | 0.1514 | 5 | 0.16 |
| 50 | 245 | 201.15 | 165.75 | 0.80 | 21.10 | 0.1459 | 5 | 0.16 |
| 51 | 250 | 200.35 | 164.95 | 0.80 | 20.30 | 0.1403 | 5 | 0.16 |
| 52 | 255 | 199.55 | 164.15 | 0.80 | 19.50 | 0.1348 | 5 | 0.16 |
| 53 | 260 | 198.75 | 163.35 | 0.80 | 18.70 | 0.1293 | 5 | 0.16 |
| 54 | 265 | 197.95 | 162.55 | 0.80 | 17.90 | 0.1237 | 5 | 0.16 |
| 55 | 270 | 197.35 | 161.95 | 0.60 | 17.30 | 0.1196 | 5 | 0.12 |
| 56 | 275 | 196.75 | 161.35 | 0.60 | 16.70 | 0.1155 | 5 | 0.12 |
| 57 | 280 | 196.15 | 160.75 | 0.60 | 16.10 | 0.1113 | 5 | 0.12 |
| 58 | 285 | 195.55 | 160.15 | 0.60 | 15.50 | 0.1072 | 5 | 0.12 |
| 59 | 290 | 194.95 | 159.55 | 0.60 | 14.90 | 0.1030 | 5 | 0.12 |
| 60 | 295 | 194.45 | 159.05 | 0.50 | 14.40 | 0.0996 | 5 | 0.10 |
| 61 | 300 | 193.95 | 158.55 | 0.50 | 13.90 | 0.0961 | 5 | 0.10 |
| 62 | 305 | 193.45 | 158.05 | 0.50 | 13.40 | 0.0926 | 5 | 0.10 |
| 63 | 310 | 193.00 | 157.60 | 0.45 | 12.95 | 0.0895 | 5 | 0.09 |
| 64 | 315 | 192.55 | 157.15 | 0.45 | 12.50 | 0.0864 | 5 | 0.09 |
| 65 | 320 | 192.10 | 156.70 | 0.45 | 12.05 | 0.0833 | 5 | 0.09 |
| 66 | 325 | 191.70 | 156.30 | 0.40 | 11.65 | 0.0805 | 5 | 0.08 |
| 67 | 330 | 191.35 | 155.95 | 0.35 | 11.30 | 0.0781 | 5 | 0.07 |
| 68 | 335 | 191.00 | 155.60 | 0.35 | 10.95 | 0.0757 | 5 | 0.07 |
| 69 | 340 | 190.65 | 155.25 | 0.35 | 10.60 | 0.0733 | 5 | 0.07 |
| 70 | 345 | 190.30 | 154.90 | 0.35 | 10.25 | 0.0709 | 5 | 0.07 |
| 71 | 350 | 189.95 | 154.55 | 0.35 | 9.90 | 0.0684 | 5 | 0.07 |
| 72 | 355 | 189.60 | 154.20 | 0.35 | 9.55 | 0.0660 | 5 | 0.07 |
| 73 | 360 | 189.30 | 153.90 | 0.30 | 9.25 | 0.0639 | 5 | 0.06 |
| 74 | 365 | 189.00 | 153.60 | 0.30 | 8.95 | 0.0619 | 5 | 0.06 |
| 75 | 370 | 188.70 | 153.30 | 0.30 | 8.65 | 0.0598 | 5 | 0.06 |
| 76 | 375 | 188.45 | 153.05 | 0.25 | 8.40 | 0.0581 | 5 | 0.05 |
| 77 | 380 | 188.20 | 152.80 | 0.25 | 8.15 | 0.0563 | 5 | 0.05 |
| 78 | 385 | 187.95 | 152.55 | 0.25 | 7.90 | 0.0546 | 5 | 0.05 |
| 79 | 390 | 187.70 | 152.30 | 0.25 | 7.65 | 0.0529 | 5 | 0.05 |
| 80 | 395 | 187.45 | 152.05 | 0.25 | 7.40 | 0.0512 | 5 | 0.05 |
| 81 | 400 | 187.20 | 151.80 | 0.25 | 7.15 | 0.0494 | 5 | 0.05 |
| 82 | 405 | 186.95 | 151.55 | 0.25 | 6.90 | 0.0477 | 5 | 0.05 |

CONTINUA TABLA 3

| LECTURA | TIEMPO MINUTOS | PESO DE LA MUESTRA | PESO MENOS TARA | DIFERENCIA DE PESO | CANTIDAD AGUA | CONTENIDO | | dw/dt |
|---------|-------------------|--------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------|------------|-------------------------|-------|
| | | | | | | DE HUMEDAD | DIFERENCIA DE TIEMPO | |
| 83 | 410 | 186.75 | 151.35 | 0.20 | 6.70 | 0.0463 | 5 | 0.04 |
| 84 | 415 | 186.55 | 151.15 | 0.20 | 6.50 | 0.0449 | 5 | 0.04 |
| 85 | 420 | 186.35 | 150.95 | 0.20 | 6.30 | 0.0436 | 5 | 0.04 |
| 86 | 425 | 186.15 | 150.75 | 0.20 | 6.10 | 0.0422 | 5 | 0.04 |
| 87 | 430 | 185.95 | 150.55 | 0.20 | 5.90 | 0.0408 | 5 | 0.04 |
| 88 | 435 | 185.80 | 150.40 | 0.15 | 5.75 | 0.0398 | 5 | 0.03 |
| 89 | 440 | 185.65 | 150.25 | 0.15 | 5.60 | 0.0387 | 5 | 0.03 |
| 90 | 445 | 185.50 | 150.10 | 0.15 | 5.45 | 0.0377 | 5 | 0.03 |
| 91 | 450 | 185.35 | 149.95 | 0.15 | 5.30 | 0.0366 | 5 | 0.03 |
| 92 | 455 | 185.20 | 149.80 | 0.15 | 5.15 | 0.0356 | 5 | 0.03 |
| 93 | 460 | 185.05 | 149.65 | 0.15 | 5.00 | 0.0346 | 5 | 0.03 |
| 94 | 465 | 184.90 | 149.50 | 0.15 | 4.85 | 0.0335 | 5 | 0.03 |
| 95 | 470 | 184.75 | 149.35 | 0.15 | 4.70 | 0.0325 | 5 | 0.03 |
| 96 | 475 | 184.60 | 149.20 | 0.15 | 4.55 | 0.0315 | 5 | 0.03 |
| 97 | 480 | 184.45 | 149.05 | 0.15 | 4.40 | 0.0304 | 5 | 0.03 |
| 98 | 485 | 184.35 | 148.95 | 0.10 | 4.30 | 0.0297 | 5 | 0.02 |
| 99 | 490 | 184.25 | 148.85 | 0.10 | 4.20 | 0.0290 | 5 | 0.02 |
| 100 | 495 | 184.15 | 148.75 | 0.10 | 4.10 | 0.0283 | 5 | 0.02 |
| 101 | 500 | 184.05 | 148.65 | 0.10 | 4.00 | 0.0277 | 5 | 0.02 |
| 102 | 505 | 183.95 | 148.55 | 0.10 | 3.90 | 0.0270 | 5 | 0.02 |
| 103 | 510 | 183.85 | 148.45 | 0.10 | 3.80 | 0.0263 | 5 | 0.02 |
| 104 | 515 | 183.80 | 148.40 | 0.05 | 3.75 | 0.0259 | 5 | 0.01 |
| 105 | 520 | 183.75 | 148.35 | 0.05 | 3.70 | 0.0256 | 5 | 0.01 |
| 106 | 525 | 183.70 | 148.30 | 0.05 | 3.65 | 0.0252 | 5 | 0.01 |
| 107 | 530 | 183.65 | 148.25 | 0.05 | 3.60 | 0.0249 | 5 | 0.01 |
| 108 | 535 | 183.60 | 148.20 | 0.05 | 3.55 | 0.0245 | 5 | 0.01 |
| 109 | 540 | 183.55 | 148.15 | 0.05 | 3.50 | 0.0242 | | |

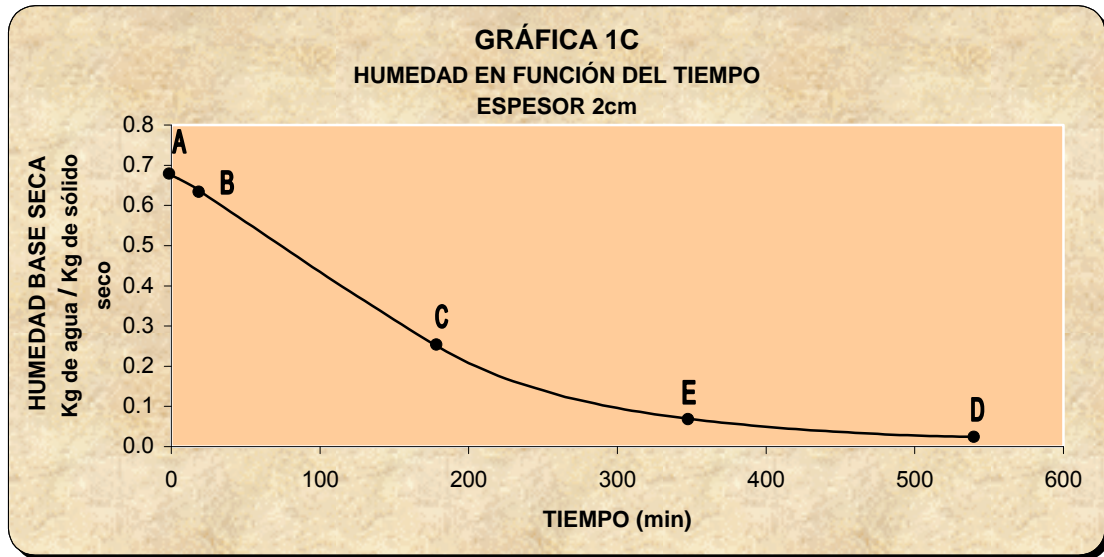
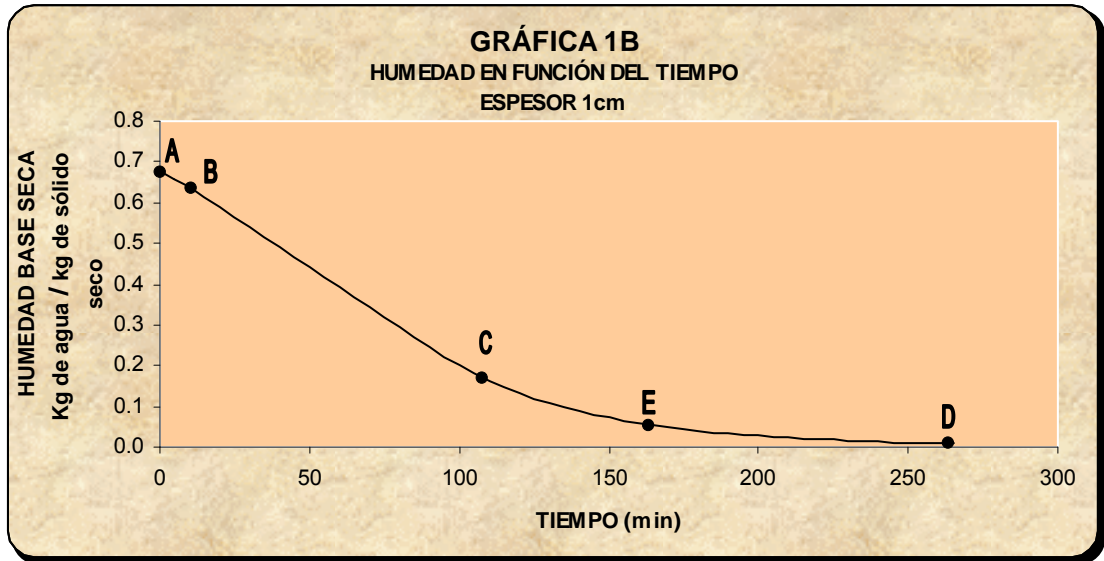
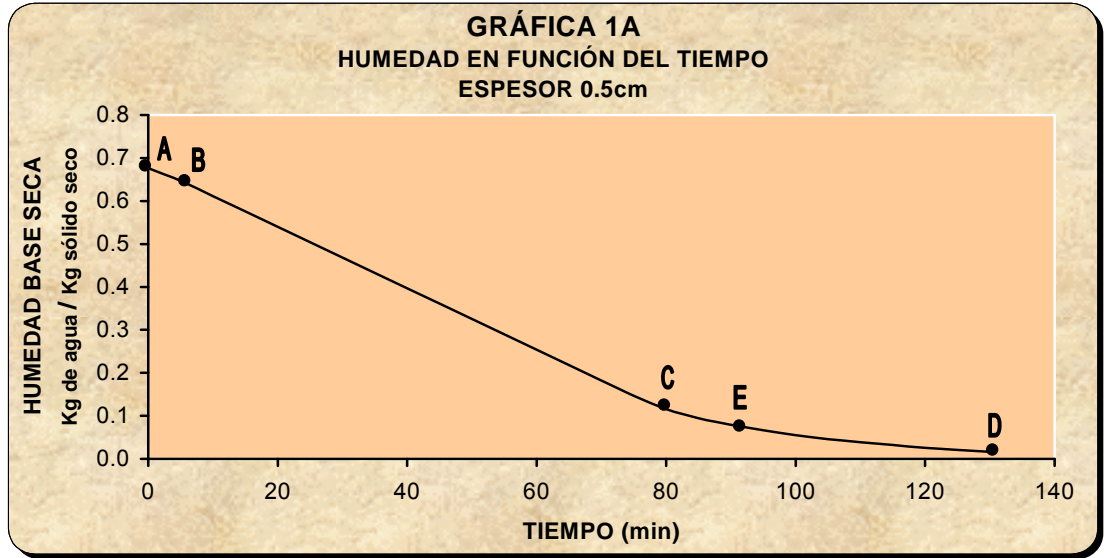
Peso final del recipiente cortado a 2cm de altura más el material = 183.55g

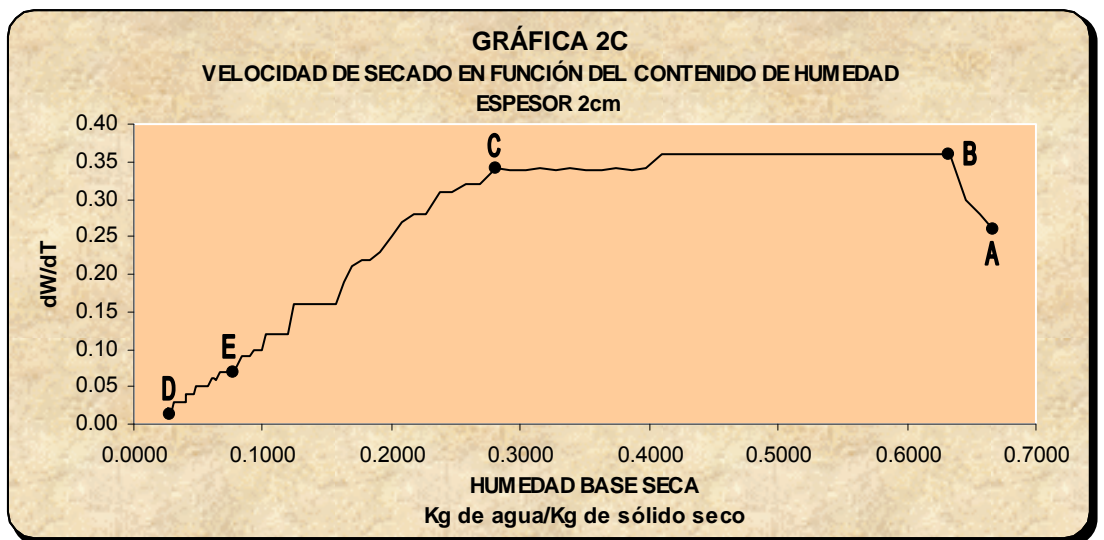
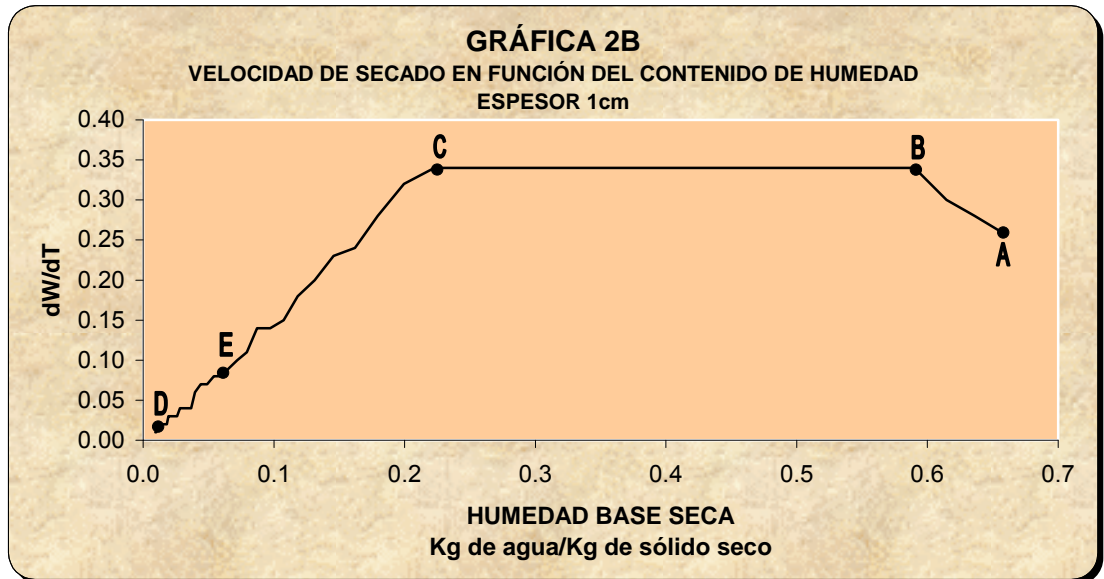
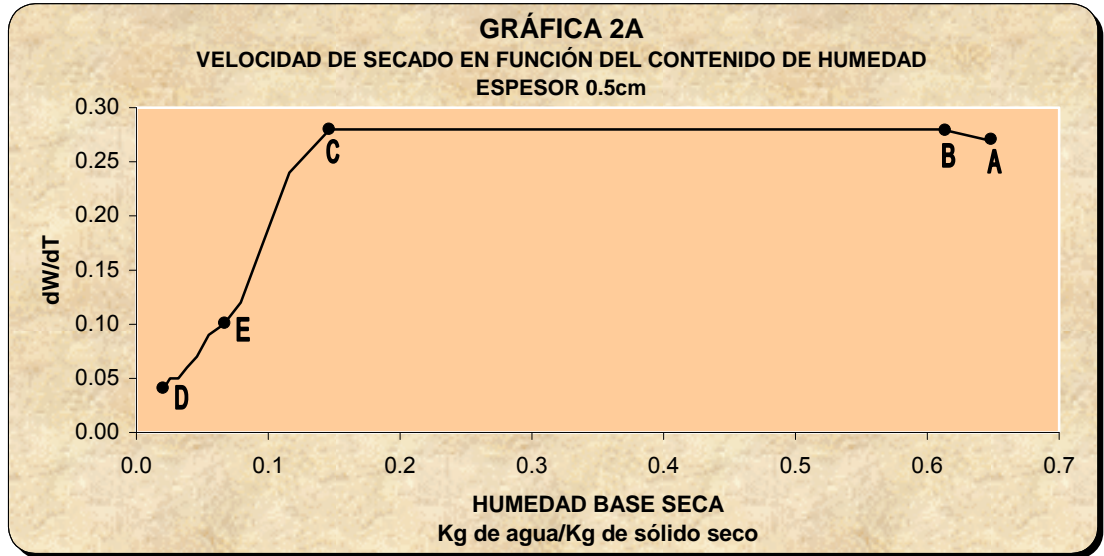
Se terminó de secar en un horno a 200°C para medir la humedad final, material a secar =148.15g

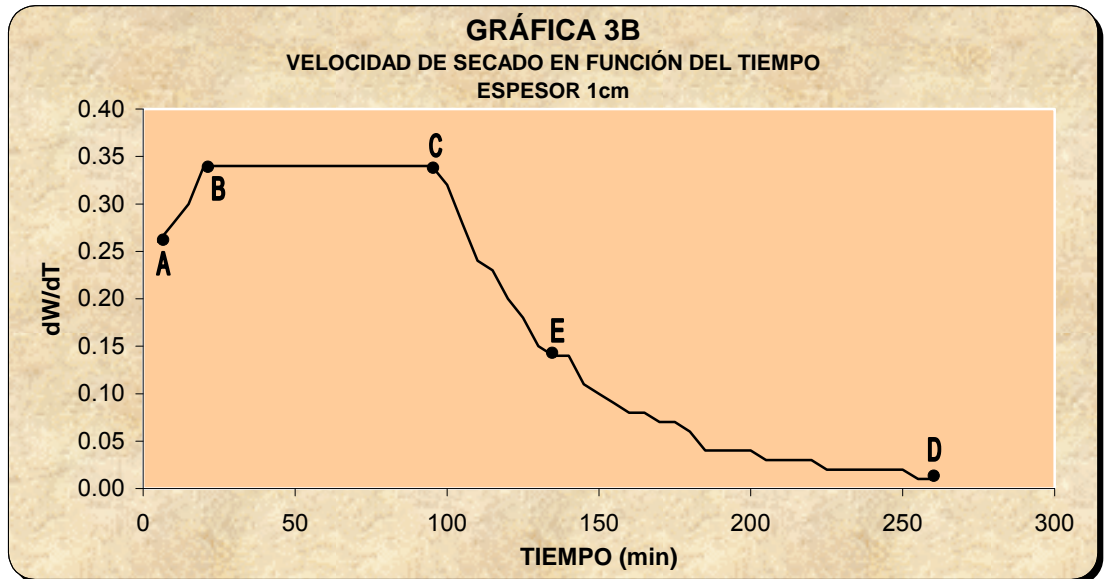
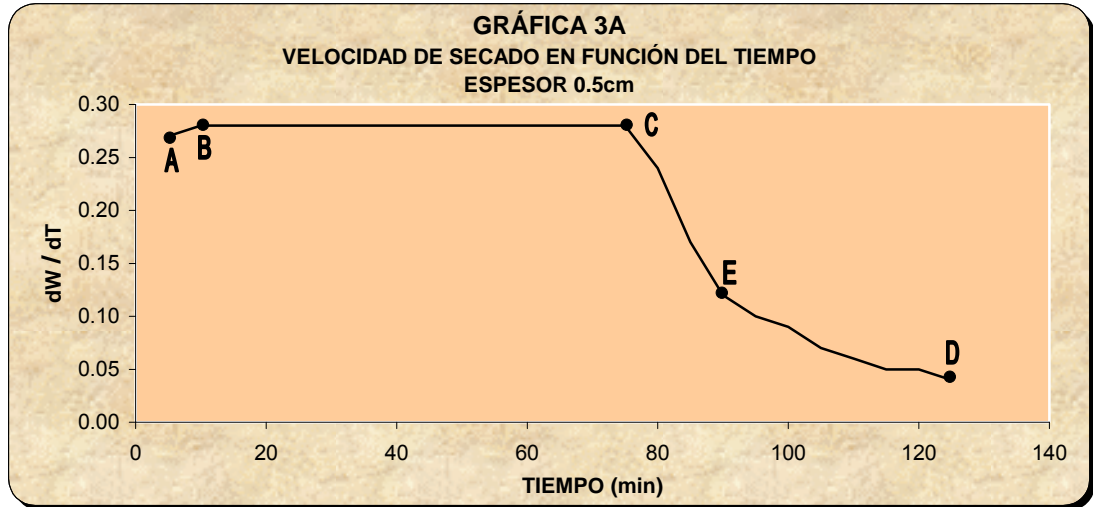
MATERIAL SECO = 144.65g

Agua que había quedado 3.5g entonces tenía al final = 0.02419 g de agua / g de sólido seco

TARA 8.2g humedad base seca 2.4%







Estas curvas de velocidad demuestran que el secado no es un proceso suave y continuo. En las gráficas 3A, 3B y 3C se ve con claridad lo que dura cada periodo del secado. En la sección BC representa un periodo de velocidad constante, en las gráficas 1A, 1B y 1C se representa con una recta de pendiente constante dW/dt y en las gráficas 2A, 2B, 2C, 3A, 3B y 3C se convierte en una línea horizontal. La sección CD se denomina periodo de velocidad decreciente. El punto E representa que toda la superficie expuesta se hace completamente insaturada y marca el principio de la porción del ciclo de secado durante el cual la velocidad de movimiento de la humedad interna controla la velocidad de desecación, **se reduce subdividiendo el material a secar**. El punto C es donde termina la velocidad constante y comienza a descender el índice de desecación, se conoce como contenido de humedad crítico. La sección CE de las gráficas 2A, 2B y 2C se define como el primer periodo de desecación con velocidad decreciente y DE como el segundo periodo de velocidad decreciente. La sección AB representa un lapso de calentamiento. Ahora la limitación de la velocidad de secado está dada principalmente por el coeficiente de transferencia de materia, este hecho nos muestra la existencia de dos etapas de secado, periodo de velocidad constante y periodo de velocidad decreciente.

3.3.1. PERIODO DE VELOCIDAD CONSTANTE

El secado se desarrolla por difusión de vapor desde la superficie saturada del material, pasando por una capa de aire estancado hasta el

medio que lo rodea. El movimiento de la humedad dentro del sólido es lo suficientemente rápida 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. La velocidad de transferencia de masa se equilibra con la velocidad de transmisión de calor y la temperatura de la superficie saturada permanece constante. Si el calor se transfiere exclusivamente por convección la temperatura de la superficie se acerca a la temperatura de bulbo húmedo del aire, cuando el calor se transmite por radiación, conducción o combinación de ambas y convección, la temperatura se ubica entre el bulbo húmedo y la temperatura de ebullición del agua. También si la velocidad de transmisión de calor se incrementa, se obtiene mayor desecación. Cuando se transmite el calor a un sólido húmedo por conducción a través de superficies calientes y la transmisión de calor por convección es despreciable, los sólidos se acercan a la temperatura del punto de ebullición del agua más que a la de bulbo húmedo. Este método de transmisión de calor se utiliza en los secadores indirectos.

La velocidad constante depende de tres factores:

- 1.-Coeficiente de transmisión de calor y transferencia de masa.
- 2.-Área expuesta al medio de secado.
- 3.-Diferencia de temperatura o humedad entre la corriente del gas y la superficie mojada del sólido.

El mecanismo interno del flujo del líquido en el sólido no afecta la velocidad constante, ya que la superficie del material está saturada de agua.

3.3.2. PERIODO DE VELOCIDAD DECRECIENTE

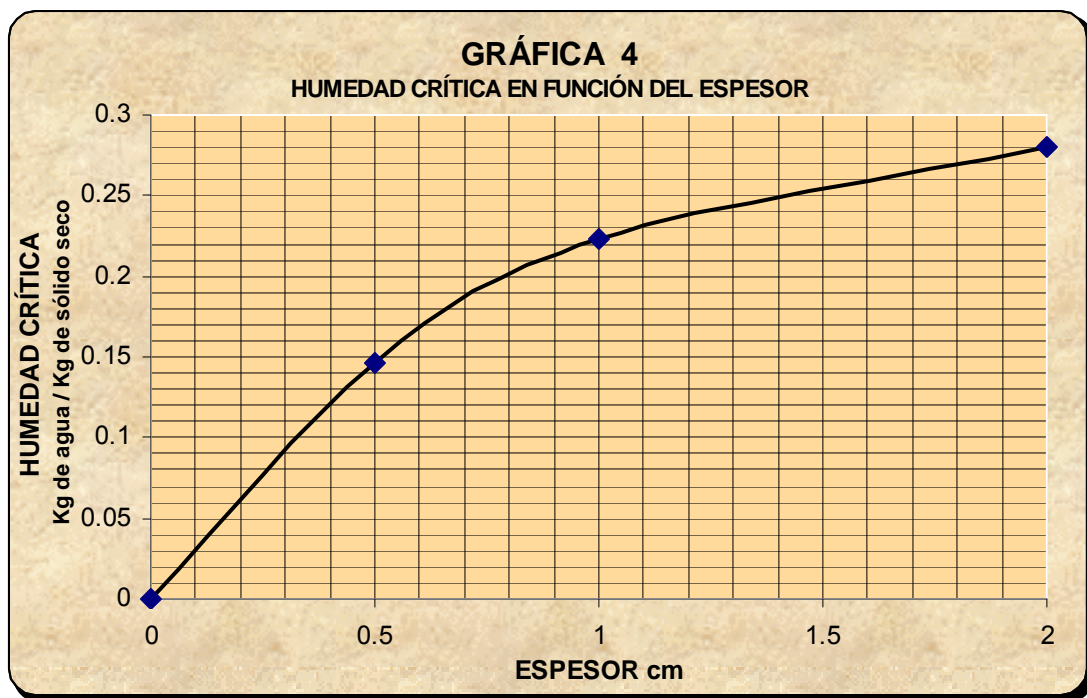
Este periodo comienza al terminar el periodo de velocidad constante. Si el contenido final de humedad es superior al contenido de humedad crítico (para las condiciones de desecación especificadas), todo el proceso de desecación se desarrollará en condiciones de velocidad constante. Y si el contenido inicial de humedad es inferior al crítico, todo el proceso de desecación se desarrollará en el periodo de la velocidad decreciente, este periodo por lo general se divide en dos zonas, la primera zona, no toda la superficie de evaporación se puede mantener saturada, por el movimiento de humedad dentro del sólido. En algunos casos, la velocidad de desecación es una función lineal, como lo señala la línea CE de las gráficas 2A, 2B y 2C. Conforme prosigue la desecación entra a la segunda zona de velocidad decreciente, donde la velocidad de desecación está regida por la velocidad del movimiento interno de la humedad, y la influencia de las variables externas van disminuyendo. Cuando se efectúa una desecación con pequeños contenidos de humedad este periodo predomina casi siempre en la determinación del tiempo total de la desecación.

De los datos experimentales obtenemos una humedad crítica, para cada espesor de material, la humedad del producto no debe de pasar de

4% base húmeda, que equivale a 4.1666% base seca, observamos en la gráfica 4, que si el material a secar se reduce durante el proceso de secado a un diámetro menor de 1.3mm todo el proceso de secado se haría en periodo de velocidad constante.

Datos para la gráfica 4:

| ESPESOR cm | HUMEDAD CRÍTICA Kg de agua / Kg de sólido seco |
|---------------|---|
| 0.50 | 0.1467 |
| 1.00 | 0.2226 |
| 2.00 | 0.2803 |



4. SELECCIÓN DEL EQUIPO DE SECADO

Se debe seleccionar los secadores que sean más adecuados para manejar el material Fe_2O_3 y el producto seco, que se pueda adaptar a la continuidad del proceso y generen un producto de las propiedades físicas deseadas.

Los factores importantes que se deben de 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:

- Mineral de alto contenido de óxido de hierro.
- Material pegajoso.
- No tóxico.
- No muy abrasivo.

b) Características físicas en seco:

- Polvo rojo.
- Densidad 1.3473 g/ml
- No flamable.
- Producto molido. Mayor de 200 mallas.
- Poco abrasivo.

2.- CARACTERÍSTICAS DE DESECACIÓN DEL MATERIAL:

- Contenido inicial de humedad 30% base húmeda.
- Contenido final de humedad máximo 4%.
- Temperatura de secado no mayor de 500°C.

- Tiempo de desecación el más corto.

3.- CIRCULACIÓN DEL MATERIAL QUE ENTRA Y SALE DEL SECADOR:

- 200 kg/h de producto mínimo.
- Deseamos una operación continua.
- Proceso siguiente a la desecación: molienda del producto.

4.- PROBLEMAS EN EL SECADO:

- Adherencia del material húmedo al secador.
- Recuperación de polvos.

LOS SECADORES SELECCIONADOS PARA MANEJAR ESTE MATERIAL SON:

- Túnel.
- Transporte neumático.
- Rotatorio directo.

4.1. SECADOR DE TÚNEL

Los sólidos que se van a secar se colocan en bandejas o carretillas que se desplazan progresivamente a lo largo de un túnel relativamente largo, en donde están en contacto con gases calientes para evaporar la humedad. El tiempo de residencia debe de ser largo. El funcionamiento es semicontinuo, cuando el túnel está lleno, una de las bandejas se saca por el extremo de la descarga al mismo tiempo que se

introduce otra en el extremo de la alimentación, las carretillas o bandejas se desplazan sobre carriles o monorraíles y se mueven por medios mecánicos utilizando cadenas conectadas a la base de cada carretilla. El secador de túnel se descartó ya que los costos de operación son altos, debido al llenado de las bandejas, descarga de las bandejas, recirculación de las bandejas a la zona de llenado, necesita mayor mano de obra. Existen túneles de transportador de banda y transportador de criba que tienen un funcionamiento realmente continuo representan ahorros de mano de obra en comparación con las operaciones de carga y descarga de las bandejas, pero requieren una inversión adicional para los dispositivos automáticos de alimentación y descarga.⁽¹⁾ Por lo tanto por su alto costo de operación e inversión queda descartado.

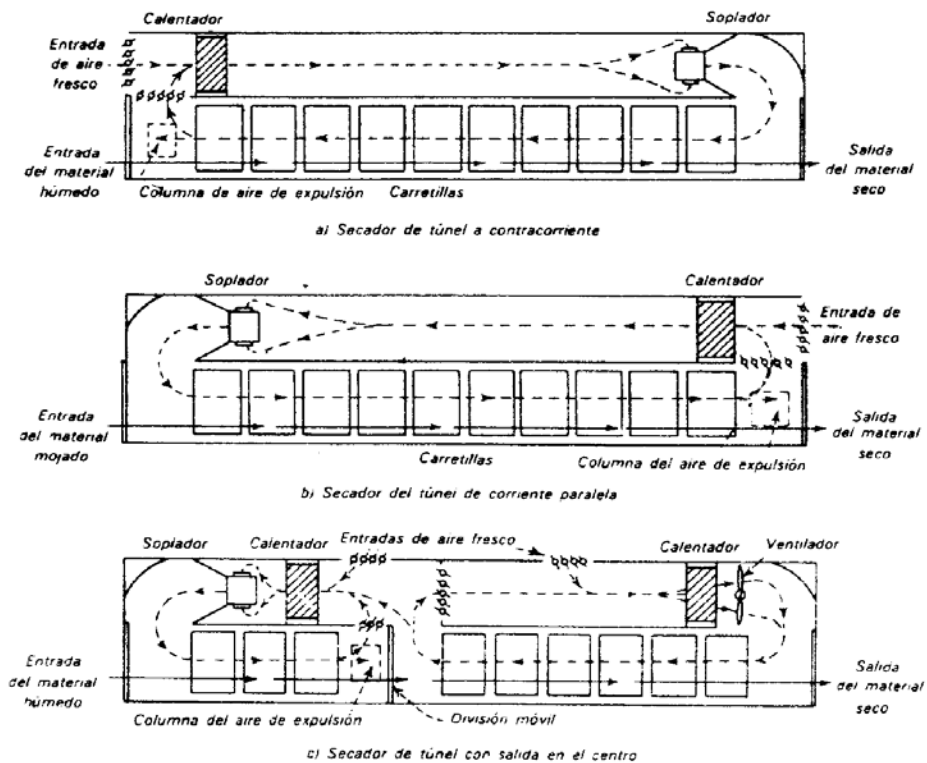


Figura 20-30. Tres tipos de secadores de túnel. [Van Arsdal., *Food Ind.*, 14 (10), 43 (1942).]

4.2. SECADOR 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, en la condición diluida las partículas sólidas están tan dispersas en el gas que aparentemente no manifiestan ningún efecto unas con otras y no ofrecen casi ninguna resistencia al paso del gas entre ellas.⁽¹⁾ Tiene que ser suficiente la cantidad y velocidad del gas para levantar y transportar los sólidos que se oponen a la fuerza de gravedad, el contacto del sólido y el gas es de unos cuantos segundos, es ideal para sólidos sensibles al calor, que no es nuestro caso. Un secador de transporte neumático consta de un tubo o conducto largo que lleva un gas a alta velocidad (25 m/s)⁽²⁾, necesita un ventilador para expulsar el gas, un dosificador apropiado para agregar y dispersar los sólidos en la corriente del gas y un ciclón u otro equipo de separación para la recuperación final de los sólidos del gas.

Se pueden usar varias clases de alimentadores de sólidos, los de tornillo sinfín, secciones venturi, trituradores de alta velocidad y molinos de dispersión. Para el transportador neumático, la elección del alimentador correcto para asegurar una minuciosa dispersión inicial de los sólidos en el gas, constituye un factor de primordial importancia.

Analizando el funcionamiento de estos secadores es importante la alimentación pero como el material a secar contiene impurezas sólidas (piedras) entonces se tendrían problemas en los alimentadores de tornillo sinfín, sección venturi, que se podrían atorar y con respecto a los trituradores y molinos de dispersión, las impurezas sólidas se molerían con

el material y de esta forma bajando su calidad. Por lo tanto también queda descartado este tipo de secador.

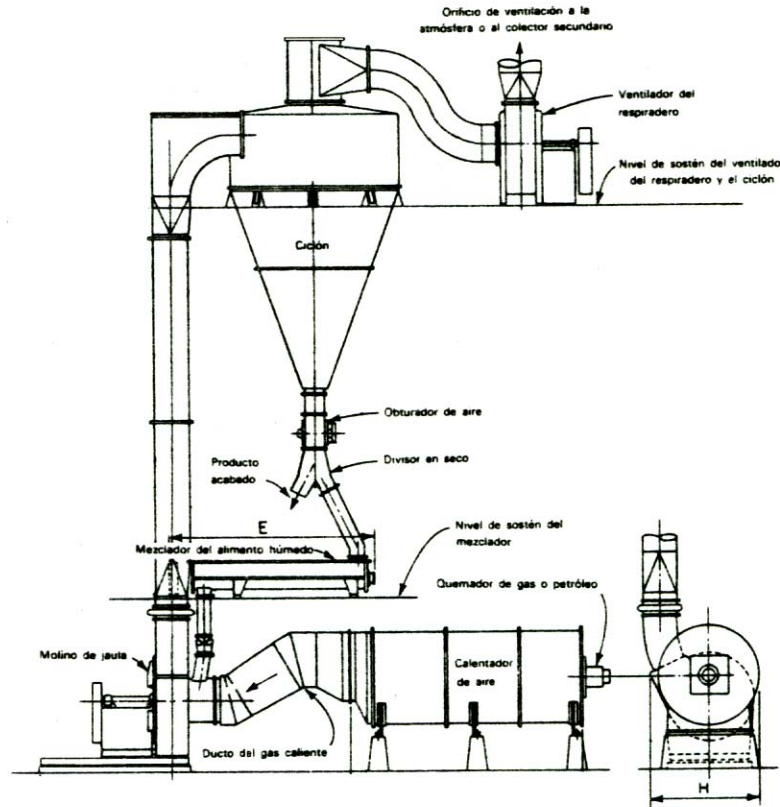


Figura 20-69. Secador de transportador neumático de una sola etapa (*Raymond Division Combustion Engineering, Inc.*).

4.3. SECADOR ROTATORIO DE FUEGO DIRECTO

Forman un grupo muy importante de secadores, son adecuados para manejar materiales granulares de flujo libre que pueden **arrojarse sin temor de romperlos.**

Es obvio que el material a secar no debe ser pegajoso ni chicoso, puesto que podría pegarse en las paredes del secador o tendería a

apelotonarse, en estos casos, la recirculación de una parte del producto seco puede permitir el uso de este secador.

Los secadores rotatorios se fabrican para diversas operaciones, la clasificación siguiente incluye los tipos principales.

1.- calor directo, flujo a contracorriente:

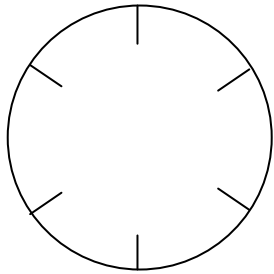
Para materiales que pueden calentarse a temperaturas elevadas, como minerales, arena, piedra caliza, arcillas, etc. Se puede utilizar gases de combustión como gas de secado. Se puede utilizar aire caliente para sustancias que no se pueden calentar demasiado, como el sulfato de amonio o azúcar de caña. En este secador el material a secar entra por un extremo y el aire caliente o gases de combustión entran por el otro lado y se cruzan⁽²⁾.

2.- calor directo, flujo corriente paralela:

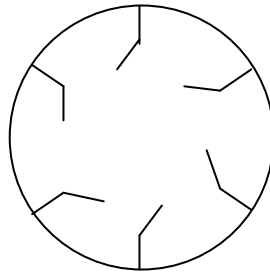
Los sólidos que pueden secarse con gas de combustión sin miedo de contaminarlos, pero que no deben de calentarse a temperaturas muy elevadas por temor a dañarlos, como yeso, **piritas de hierro** y materiales orgánicos. En este secador el gas y el material a secar entran por el mismo extremo del secador⁽²⁾.

Este equipo es un cilindro alargado con una relación de $L/D = 4$ a 10 y contiene en el interior aspas para levantar y dejar caer los sólidos a través de la corriente de aire que pasa a lo largo del cilindro, estas aspas casi siempre tienen una ubicación alterna cada 2 o 6 ft para asegurar una cortina de sólidos más continua y uniforme en el gas⁽¹⁾. La forma de aspas

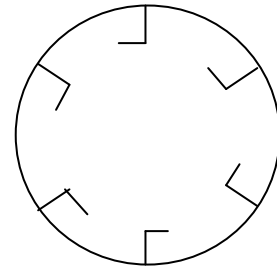
depende de las características del material, en el caso de materiales con movimiento libre, se usan aspas de 90° o por el contrario con materiales pegajosos se usan aspas planas⁽¹⁾.



CILINDRO CON ASPAS PLANAS



CILINDRO CON ASPAS 45°



CILINDRO CON ASPAS 90°

Cuando el material cambia de características durante el paso del cilindro se pueden utilizar los tres tipos de aspas a lo largo del cilindro. En los primeros centímetros de entrada al cilindro casi siempre se instalan aspas espirales para facilitar la entrada del material al cilindro y que no se regrese y evitar de esta manera fugas en el anillo de retén en el extremo de la alimentación. Cuando se usa una corriente paralela de gas-sólido las aspas generalmente no se ponen en los últimos centímetros del cilindro para reducir el arrastre del producto seco en el gas de salida. Para un secador a contracorriente, el polvo en el aire provocado por el movimiento del secador es lavado por el material mojado de alimentación. Algunos secadores están provistos con aspas con dientes de sierra para obtener un lanzamiento uniforme, mientras otros emplean tramos de cadenas unidas al lado inferior de las aspas para raspar y golpear la pared del cilindro, removiendo así los sólidos pegajosos que puedan adherirse a la

pared del cilindro, los sólidos que se adhieren a las aspas y a la pared del cilindro se despegan con mayor eficiencia con golpeadores externos al cilindro.

La altura de las aspas internas varía $1/12$ a $1/18$ del diámetro del secador. El número de aspas oscila de $2D$ a $3D$ $D = \text{ft}$ para secadores con diámetros mayores de 2 ft.⁽¹⁾

El flujo a contracorriente del gas-sólido genera mayor eficiencia de transferencia de calor, pero en el flujo de corriente paralela se utiliza para secar materiales **sensibles al calor y pegajosos** y nos permite utilizar temperatura del gas más elevada, debido al rápido enfriamiento que sufre el gas durante la evaporación inicial de la humedad de la superficie del material.

Cada uno de los extremos del cilindro tienen una caja llamada de humo o terminal y cabezal de entrada estas están selladas con el cilindro móvil, ninguno de estos sellos para sólidos es eficaz y tampoco funcionan satisfactoriamente, pero si la presión interna oscila entre 0.01 y 0.1 pulgadas de agua por debajo de la presión atmosférica se evita la salida de polvo al exterior, los gases se hacen pasar por el cilindro mediante un extractor o una combinación de extractor y ventilador. Con un extractor es posible mantener un control muy preciso de la presión interna del cilindro, incluso cuando la caída de presión total del sistema es importante, casi siempre basta con utilizar un extractor, dado que las principales pérdidas de

presión del gas se localizan en los ductos de salida del aire y en los recolectores de polvo, ciclones, filtros de lonas y lavadores de gases. Rara vez se coloca un ventilador para forzar el paso del aire por el cilindro ya que puede provocar fugas de polvo y aire caliente por los sellos debido a que la presión interna del cilindro sería mayor que la atmosférica⁽¹⁾.

Generalmente la tolva de descarga o caja de humo en un secador de corriente paralela es de mayor tamaño al área transversal del cilindro con el fin de reducir la velocidad del aire y asegurar una mayor retención de sólidos.

Los secadores rotatorios operan entre el 10 al 15% de su volumen del cilindro, un llenado menor sería insuficiente para utilizar plenamente los elevadores.

Si el tiempo que dura el material en el secador es muy breve, podría no ser suficiente para eliminar toda la humedad interna, o bien, si el llenado de los elevadores es incorrecto, el funcionamiento del secador puede ser errático.

El tiempo de residencia en los secadores rotatorios se calcula, aplicando las relaciones que desarrollaron Friedman y Marshall⁽¹⁾ :

$$\text{Tiempo } (\theta) = \frac{0.23 L}{S N^{0.9} D} \pm 0.6 \frac{B L G}{F}$$

$$B = 5 D_p^{-0.5}$$

| | |
|--------------|--|
| B | Constante que depende del material |
| Dp | Tamaño de partícula en micras |
| F | Índice de alimentación al secador lb material seco/h ft ² |
| T (θ) | Tiempo de paso en minutos |
| S | Pendiente del cilindro ft/ft |
| N | Velocidad RPM |
| L | Longitud del cilindro |
| G | masa Velocidad del aire lb/h ft ² |
| D | Diámetro del cilindro ft |
| (-) | Signo menos circulación paralela |

Los secadores funcionan con velocidades periféricas de 50-100 ft/min. Las pendientes varían de 0 y 1 in/ft en algunos casos en corrientes paralelas se usan pendientes negativas. ⁽¹⁾

La masa velocidad del aire en secadores rotatorios varían, por lo común de 400 a 4000 lb/(h)(ft²)₍₁₎. Se debe utilizar la máxima masa velocidad posible pero hay que tener cuidado con el arrastre de polvo que depende del estado físico del material, cantidad de elevadores, velocidad de rotación y la construcción de la caja de humo. Su predicción exacta sólo se logra por medio de pruebas experimentales. En general se puede utilizar

con seguridad una masa velocidad del aire de $1000 \text{ lb} / (\text{h})(\text{ft}^2)$ con sólidos de malla 35⁽¹⁾.

La eficiencia térmica de un secador rotatorio de calor directo para temperaturas elevadas varía del 55-75%, en el caso del aire calentado con vapor varía de 30-55%.⁽¹⁾

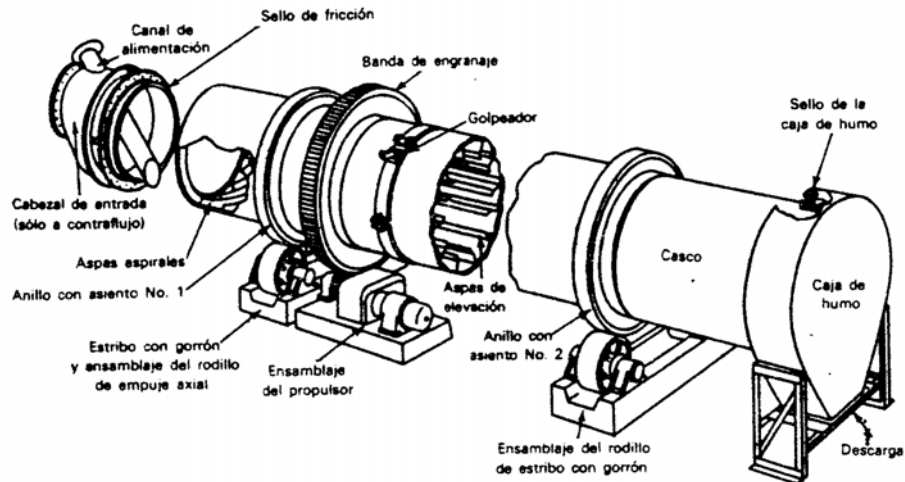


Figura 20-36. Configuración de los componentes de un secador rotatorio a contracorriente y de calor directo (CE Raymond/Bartlett-Snow Co.).

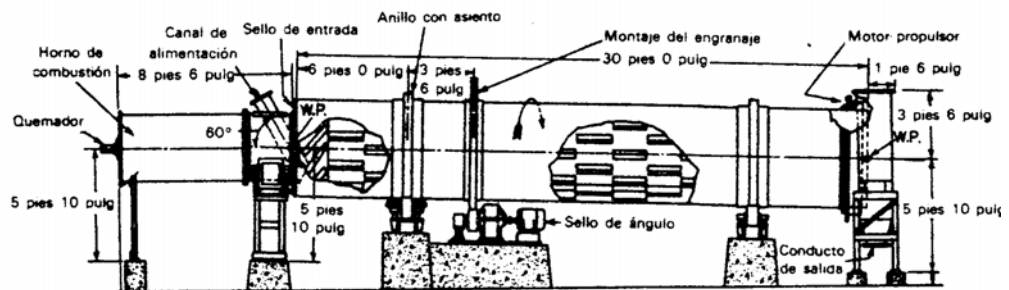


Figura 20-36. Elevación de un secador rotatorio de corriente paralela y calor directo, de 60 pulg de diámetro y 30 pies de largo (CE Raymond/Bartlett-Snow Co.).

Se decidió fabricar el secador de calor directo, flujo de corriente paralela porque:

- Los gases de combustión no afectan al material a secar.
- Es adecuado para materiales pegajosos.
- Nos permite utilizar temperatura del gas más elevada.
- Puede secar grandes cantidades de material.

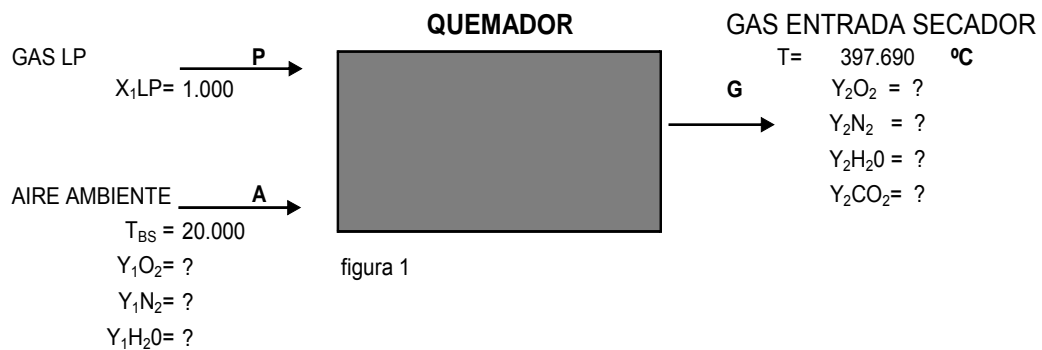
- Es continuo
- Mano de obra baja
- Fácil manejo
- Se podría separar las impurezas del material (piedras) con una malla.

5. CÁLCULOS PARA EL DISEÑO DEL SECADOR

5.1. CÁLCULO DEL GAS DE ENTRADA AL SECADOR

Para poder hacer el cálculo del secador es necesario obtener la composición del aire caliente en la entrada del secador, corriente G.

Necesitamos calentar aire del ambiente por medio de un quemador, introduciendo GAS LP, como se ilustra en la figura 1.



TEMPERATURA BULBO SECO T_{BS} EN EL AIRE CORRIENTE A :

$$T_{BS} (T_{BS} \text{ amb}) = 20.0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

TEMPERATURA DE BULBO HÚMEDO T_{BH} EN EL AIRE CORRIENTE A :

$$T_{BH} (T_{BH} \text{ amb}) = 17.0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

PRESIÓN DE VAPOR DEL AGUA A TEMPERATURA DE BULBO HÚMEDO :

$$\text{PRESIÓN DE VAPOR } (P_v) = 14.5329 \text{ mmHg} \quad \text{APÉNDICE A}$$

HUMEDAD EN TEMPERATURA BULBO HÚMEDO :

$$Y_w = P_v / (P_T - P_v) * (P_{M \text{ H}_2\text{O}}) / (P_{M \text{ AIRE}}) \quad (2) \text{ PAG.254}$$

$$Y_w = 0.0162 \text{ Kg de agua /Kg de aire seco}$$

CALOR LATENTE A TEMPERATURA BULBO HÚMEDO :

$$\lambda_W = 587.8206 \text{ Kcal / Kg} \quad \text{APÉNDICE B}$$

CAPACIDAD CALORÍFICA DEL AIRE A T_{BS} :

INTERVALO 298°K A 1500°K

$$C_p = a + bT + cT^2 \quad T \text{ en } ^\circ\text{k}$$

Capacidad calorífica molar promedio⁽³⁾ pag. 63

$$C_{pm} = a + b(t_2 + t_1) / 2 + c(t_2^2 + t_1 t_2 + t_1^2) / 3$$

Cpm del AIRE EN EL AMBIENTE CORRIENTE A

| COMPONENTE | t ₁ °C | t _{gc} °C | CONSTANTES | | | Cpm Kcal/Kg mol °K |
|---------------------------------|-------------------|--------------------|------------|------------|-------------|-----------------------|
| | | | a | b | c | |
| O ₂ | 0.000 | 20.000 | 6.148 | 3.1020E-03 | -9.2300E-07 | 6.952 |
| N ₂ | 0.000 | 20.000 | 6.524 | 1.2500E-03 | -1.0000E-09 | 6.878 |
| H ₂ O _(g) | 0.000 | 20.000 | 7.256 | 2.2980E-03 | 2.8300E-07 | 7.929 |

(3) Pag.99

$$C_{pA \text{ PROM DEL AIRE SECO DEL AMBIENTE}} = (Y_{1O_2} C_{p1 O_2} + Y_{1N_2} C_{p1 N_2}) / (\text{moles de gas seco} \cdot \text{PM de gas seco})$$

$$C_{pA \text{ PROM DEL AIRE SECO}} = C_{p \text{ PROM A}} (C_B) = 0.239 \text{ Kcal/Kg}^\circ\text{K}$$

CAPACIDAD CALORÍFICA DEL AGUA A T amb :

$$C_P \text{ AGUA } (C_A) = 7.929 \text{ Kcal/Kg mol }^\circ\text{K}$$

HUMEDAD DEL AMBIENTE :

DESPEJANDO "Y" DE LA SIGUIENTE ECUACIÓN :

$$T_{BS} - T_{BH} = (Y_W - Y) * \lambda_W / (C_B + Y * C_A) \quad (2) \text{ Pag. 259}$$

$$\text{HUMEDAD DEL AMBIENTE } Y = 0.0149 \text{ Kg de agua / Kg de aire seco}$$

5.1.1. CÁLCULO DE LA COMPOSICIÓN DEL AIRE EN LA CORRIENTE A:

EL PESO MOLECULAR DEL AIRE SECO:

$$\text{PM AIRE SECO} = \text{PM N}_2 * (0.79) + \text{PM O}_2 * (0.21)$$

$$\text{PM N}_2 = 28.013 \text{ Kg/Kg mol}$$

$$\text{PM O}_2 = 32.000 \text{ Kg/Kg mol}$$

$$\text{PM}_{\text{AIRE SECO}} = 28.851 \text{ Kg/Kg mol}$$

PONEMOS COMO BASE 100 KG DE AIRE SECO.

$$\text{Kgmol DE AIRE SECO} = \frac{100 \text{ Kg DE AIRE SECO}}{\text{PM AIRE SECO}} = 3.466 \quad \text{Kgmol de aire seco}$$

$$\text{Kg de agua} = \text{humedad del aire} * \text{Kg de aire seco}$$

$$\text{Kg de agua} = 1.490 \quad \text{Kg de agua}$$

$$\text{Kgmol de agua} = \text{Kg de agua} / \text{PM de H}_2\text{O}$$

$$\text{Kgmol de agua} = 0.083 \quad \text{Kgmol de agua}$$

$$\text{Kgmol totales} = \text{Kgmol de aire seco} + \text{Kgmol de agua}$$

$$\text{Kgmol totales} = 3.549 \quad \text{Kgmol} \quad \text{EN LA CORRIENTE A}$$

$$\text{FRACCIÓN MOL DE OXÍGENO} \quad Y_{1O_2} = 0.21 * \text{Kgmol de aire seco} / \text{Kgmol totales}$$

$$\text{FRACCIÓN MOL DE NITRÓGENO} \quad Y_{1N_2} = 0.79 * \text{Kgmol de aire seco} / \text{Kgmol totales}$$

$$\text{FRACCIÓN MOL DE AGUA} \quad Y_{1H_2O} = \text{Kgmol de agua} / \text{Kgmol totales}$$

COMPOSICIÓN DEL AIRE CORRIENTE A

| COMPONENTE | FRACCIÓN MOL | PM | Kg |
|-------------|--------------|-------|-----------|
| Y_{1O_2} | 0.205089 | 32.00 | 6.562840 |
| Y_{1N_2} | 0.771524 | 28.01 | 21.610398 |
| Y_{1H_2O} | 0.023387 | 18.02 | 0.421431 |

$$\text{AIRE SECO} = 1 - Y_{1H_2O}$$

$$\text{AIRE SECO} = 0.977 \quad \text{Kgmol de aire seco}$$

$$\text{PESO SECO TOTAL} = \text{Kg}_{Y_{1O_2}} + \text{Kg}_{Y_{1N_2}} + \text{Kg}_{Y_{1CO_2}}$$

$$\text{PESO SECO TOTAL} = 28.173 \quad \text{Kg de aire seco}$$

$$\text{PESO MOLECULAR PROM. DEL AIRE} = \text{Kg de aire seco} / \text{Kgmol de aire seco}$$

$$\text{PESO MOLECULAR PROM. DEL AIRE SECO} = 28.848 \quad \text{Kg/Kgmol}$$

5.1.2. CÁLCULO DE LA COMPOSICIÓN DEL AIRE EN LA CORRIENTE G

Capacidad calorífica de los gases en la corriente G.

INTERVALO 298°K A 1500°K

$$C_p = a + bT + cT^2 \quad T \text{ en } ^\circ\text{K}$$

Capacidad calorífica molar promedio

$$C_{pm} = a + b(t_2 + t_1) / 2 + c(t_2^2 + t_1 t_2 + t_1^2) / 3$$

| COMPONENTE | t ₁ | t ₂ | CONSTANTES | | | Cpm |
|--------------------------------|----------------|----------------|------------|------------|-------------|----------------|
| | | | a | b | c | Kcal/Kg mol °K |
| O ₂ | 20.000 | 397.690 | 6.148 | 3.1020E-03 | -9.2300E-07 | 7.417 |
| O _{2C} | 20.000 | 25.000 | 6.148 | 3.1020E-03 | -9.2300E-07 | 6.984 |
| N ₂ | 20.000 | 397.690 | 6.524 | 1.2500E-03 | -1.0000E-09 | 7.126 |
| CO ₂ | 25.000 | 397.690 | 6.214 | 1.0396E-02 | -3.5450E-06 | 10.377 |
| H ₂ O _H | 20.000 | 397.690 | 7.256 | 2.2980E-03 | 2.8300E-07 | 8.432 |
| H ₂ O _F | 25.000 | 397.690 | 7.256 | 2.2980E-03 | 2.8300E-07 | 8.439 |
| C ₃ H ₈ | 20.000 | 25.000 | 2.410 | 5.7195E-02 | -1.7533E-05 | 17.780 |
| C ₄ H ₁₀ | 20.000 | 25.000 | 3.844 | 7.3350E-02 | -2.2655E-05 | 23.541 |

(3) pag. 99

O_{2C} = OXÍGENO CONSUMIDO POR LA COMBUSTIÓN

H₂O_H = AGUA DE LA HUMEDAD DEL AMBIENTE

H₂O_F = AGUA FORMADA POR LA COMBUSTIÓN DEL GAS LP

BASE 1 Kg mol DE GAS LP (P=1):

$$P = 1.000 \quad \text{Kg mol}$$

$$\text{CALOR LATENTE DEL AGUA} = \lambda_{\text{H}_2\text{O A } 25^\circ\text{C}} = 583.000 \quad \text{Kcal/Kg}$$

CALORES DE COMBUSTIÓN:

$$\Delta H_{CP^\circ} = 530,605.00 \quad \text{Kcal/Kg mol} \quad \text{PROPANO}$$

$$\Delta H_{CB^\circ} = 687,982.00 \quad \text{Kcal/Kg mol} \quad \text{BUTANO}$$

(3) pag. 299

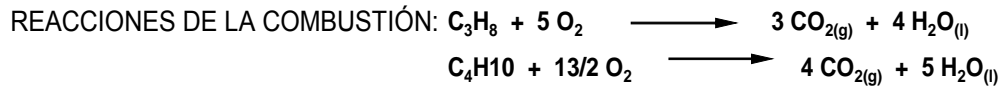
COMPOSICIÓN GAS LP:

| | % VOLUMEN | |
|---------|-----------|---|
| PROPANO | 30.0 | NOTA: ESTE PORCENTAJE VARÍA EN DIFERENTES REGIONES DE MÉXICO |
| BUTANO | 70.0 | |

$$\text{DATO:} \quad C_{p\text{H}_2\text{O}_L} = 1.000 \quad \text{Kcal/Kg}^\circ\text{C}$$

CONSIDERANDO QUE EL AGUA GENERADA POR LA COMBUSTIÓN SE EVAPORA INMEDIATAMENTE.

5.1.3. BALANCE DE MATERIA:



BALANCE DE O_2 :

MOLES DE OXÍGENO CORRIENTE G :

MOLES QUE ENTRAN EN EL AIRE MENOS MOLES QUE REACCIONAN CON EL GAS LP.

$$n_{2O_2} = A * Y_{1O_2} - P * (5\% \text{PROPANO} + 13/2\% \text{BUTANO}) / 100$$

$$n_{2O_2} = A \quad 0.20511 \quad -6.050 \quad \dots\dots 1$$

MOLES DE OXÍGENO PARA LA COMBUSTIÓN :

$$n_{0O_2} = P * (5\% \text{PROPANO} + 13/2\% \text{BUTANO}) / 100$$

$$n_{0O_2} = 6.050 \quad \text{Kgmol} \quad \dots\dots 2$$

BALANCE DE N_2 :

MOLES DE NITRÓGENO EN LA CORRIENTE G :

$$n_{2N_2} = A * Y_{1N_2}$$

$$n_{2N_2} = A \quad 0.77159 \quad \dots\dots 3$$

BALANCE DE CO_2 EN LA CORRIENTE G :

MOLES DE CO_2 EN LA CORRIENTE G PRODUCIDAS POR LA COMBUSTIÓN :

$$n_{2CO_2} = P * (3\% \text{PROPANO} + 4\% \text{BUTANO}) / 100$$

$$n_{2CO_2} = 3.700 \quad \text{Kgmol} \quad \dots\dots 4$$

BALANCE DE AGUA :

MOLES DE AGUA EN LA ENTRADA CORRIENTE A :

$$n_{1H_2O} = A * Y_{1H_2O}$$

$$n_{1H_2O} = A \quad 0.02331 \quad \dots\dots 5$$

BALANCE DE AGUA FORMADA EN LA COMBUSTIÓN:

$$n_{F\text{H}_2\text{O}_F} = P \cdot (4\% \text{PROPANO} + 5\% \text{BUTANO}) / 100$$

$$n_{F\text{H}_2\text{O}_F} = 4.700 \quad \text{KGMOL de agua formada} \quad \dots\dots 6$$

CALOR DE COMBUSTIÓN DEL GAS LP:

$$\Delta H_{CT^\circ} = (\Delta H_{CP^\circ} \cdot \% \text{PROPANO} + \Delta H_{CB^\circ} \cdot \% \text{BUTANO}) / 100$$

COMO TENEMOS UN Kgmol COMO BASE DE LA MEZCLA DE PROPANO-BUTANO ENTONCES :

CALOR DE COMBUSTIÓN DE LA MEZCLA PROPANO BUTANO

$$\Delta H_{CT^\circ} = 640768.900 \text{ Kcal}$$

5.1.4. BALANCE DE ENERGÍA:

$$\Delta H_{CT^\circ} = n_{2O_2} C_{pmO_2}(t_2-t_1) + n_{2N_2} C_{pmN_2}(t_2-t_1) + n_{2CO_2} C_{pmCO_2}(t_2-25) + n_{FH_2O} C_{pmH_2O}(t_2-25) +$$

$$+ n_{1H_2O} C_{pmH_2O}(t_2-t_1) + n_{FH_2OF} \lambda_{H_2O \text{ a } 25^\circ C} + n_{1C_3H_8} C_{pmC_3H_8}(25-t_1) + n_{1C_4H_{10}} C_{pmC_4H_{10}}(25-t_1)$$

$$+ n_{0O_2} C_{pmO_2c}(25-t_1) \quad \dots\dots\dots 7$$

SUSTITUYENDO LAS ECUACIONES 1, 2, 3, 4, 5 Y 6 EN LA ECUACIÓN 7 Y DESPEJANDO "A":

SE OBTIENE "A" POR UN BALANCE DE MATERIA Y ENERGÍA: $A = 212.412 \text{ Kgmol}$

MOLES DE OXÍGENO CORRIENTE G : $n_{2O_2} = 37.517 \text{ Kgmol}$

MOLES DE NITRÓGENO EN LA CORRIENTE G : $n_{2N_2} = 163.894 \text{ Kgmol}$

MOLES DE CO₂ EN LA CORRIENTE G PRODUCIDAS POR LA COMBUSTIÓN :

$n_{2CO_2} = 3.700 \text{ Kgmol}$

MOLES DE AGUA EN LA CORRIENTA G : $n_{2H_2O} = 9.651 \text{ Kgmol}$

MOLES TOTALES EN LA CORRIENTE G = 214.762 Kgmol

**5.1.5. COMPOSICIÓN EN LA SALIDA DEL QUEMADOR Ó ENTRADA AL SECADOR:
CORRIENTE G**

| COMPONENTE | FRACCIÓN MOL |
|---------------------------------|--------------|
| Y ₂ O ₂ | 0.174690 |
| Y ₂ N ₂ | 0.763144 |
| Y ₂ CO ₂ | 0.017228 |
| Y ₂ H ₂ O | 0.044937 |

$$G_S / \text{Kg mol de gas LP} = G * (Y_{2O_2} + Y_{2N_2} + Y_{2CO_2})$$

GAS SECO / Kg mol gas LP

$$G_S / \text{Kg mol de gas LP} = 205.111 \quad \text{Kgmol de aire seco/Kgmol de gas LP}$$

POR QUE TOMAMOS COMO BASE 1Kgmol de gas LP

5.2. ESTIMACIÓN DEL TAMAÑO DEL SECADOR:

HUMEDAD DEL MATERIAL A LA ENTRADA = 30.0 % BASE HÚMEDA

$$X = \% \text{HUMEDAD} / (100 - \% \text{HUMEDAD})$$

$$X_1 = 0.429 \quad \text{Kg de agua/Kg de sólido seco}$$

HUMEDAD DEL MATERIAL A LA SALIDA = 0.500 % BASE HÚMEDA

$$X_2 = 0.0050 \quad \text{Kg de agua/Kg de sólido seco}$$

PRODUCTO SECO CON LA HUMEDAD DESEADA = 500.000 Kg de producto/h

$$S_S = \text{sólido seco} / 3600 * (1 - X_2)$$

$$S_S = 0.138191 \quad \text{Kg de sólido seco/s}$$

$$\text{AGUA QUE SE VA A EVAPORAR} = S_S * (X_1 - X_2)$$

$$\text{AGUA QUE SE VA A EVAPORAR} = 0.059 \quad \text{Kg de agua/s}$$

BASE 1 Kgmol DE AIRE ENTRANTE PARA CALCULAR Y₁.

| COMPONENTE | Kgmol | Kg/Kgmol | Kg |
|------------------------------|----------|----------|--------|
| Y _{1O₂} | 0.174690 | 32.000 | 5.590 |
| Y _{1N₂} | 0.763144 | 28.013 | 21.378 |
| Y _{1CO₂} | 0.017228 | 44.000 | 0.758 |
| Y _{1H₂O} | 0.044937 | 18.020 | 0.810 |

$$\text{AIRE SECO} = 1 - Y_1 H_2O$$

$$\text{AIRE SECO} = 0.955 \quad \text{Kgmol de aire seco}$$

$$\text{PESO SECO TOTAL} = \text{Kg}Y_1O_2 + \text{Kg}Y_1N_2 + \text{Kg}Y_1CO_2$$

$$\text{PESO SECO TOTAL} = 27.726 \quad \text{Kg de aire seco}$$

$$\text{PESO MOLECULAR PROM. DEL AIRE} = \text{Kg de aire seco/Kgmol de aire seco}$$

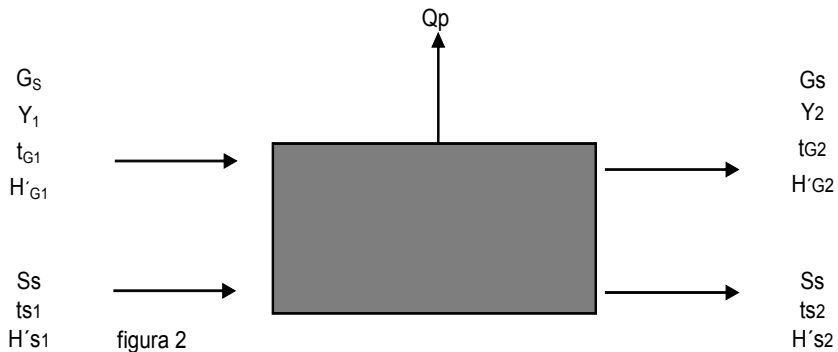
$$\text{PESO MOLECULAR PROM. DEL AIRE SECO} = 29.032 \quad \text{Kg/Kgmol} \quad \text{ES MUY SEMEJANTE AL AIRE.}$$

$Y_1 =$ Kg de agua/Kg de aire seco EN LA ENTRADA AL SECADOR

$$Y_1 = 0.0292 \quad \text{Kg de agua/Kg de aire seco}$$

5.2.1. BALANCE DE MATERIA

En la figura 2 se muestra un diagrama de flujo para un secador continuo, arreglo para flujo paralelo. El sólido entra con un flujo S_s (masa sólido seco / tiempo); se seca de X_1 a X_2 (masa humedad / masa sólido seco) y sufre el sólido un cambio de temperatura de ts_1 a ts_2 . El gas G_s (masa gas seco / tiempo) fluye del punto 1 al 2 y sufre un cambio de humedad de Y_1 a Y_2 y un cambio de temperatura tG_1 a tG_2 .



BALANCE DE HUMEDAD

(2) pag 773

$$S_s X_1 + G_s Y_1 = S_s X_2 + G_s Y_2$$

$$S_s (X_1 - X_2) = G_s (Y_2 - Y_1)$$

5.2.2. BALANCE DE ENTALPÍA

$$S_S H_{S1} + G_S H_{G1} = S_S H_{S2} + G_S H_{G2} + Q_p \quad (2) \text{ Pag. 774}$$

T_{G1} = ES LA TEMPERATURA DE SALIDA DEL QUEMADOR Ó
TEMPERATURA ENTRADA AL SECADOR.

t_1 = TEMPERATURA DE REFERENCIA

$$T_{G1} = 397.690 \quad ^\circ\text{C} \quad \text{Temperatura entrada al secador}$$

Cpm del AIRE en la entrada

| COMPONENTE | $t_1 \quad ^\circ\text{C}$ | $t_{G1} \quad ^\circ\text{C}$ | CONSTANTES | | | Cpm Kcal/Kg mol ^o K |
|------------------|----------------------------|-------------------------------|------------|------------|-------------|-----------------------------------|
| | | | a | b | c | |
| O ₂ | 0.000 | 397.690 | 6.148 | 3.1020E-03 | -9.2300E-07 | 7.394 |
| N ₂ | 0.000 | 397.690 | 6.524 | 1.2500E-03 | -1.0000E-09 | 7.114 |
| CO ₂ | 0.000 | 397.690 | 6.214 | 1.0396E-02 | -3.5450E-06 | 10.283 |
| H ₂ O | 0.000 | 397.690 | 7.256 | 2.2980E-03 | 2.8300E-07 | 8.407 |

$$C_{p1 \text{ PROM DEL AIRE SECO EN LA ENTRADA}} = (Y_{1O_2} C_{pm1 O_2} + Y_{1N_2} C_{pm1 N_2} + Y_{1CO_2} C_{pm1 CO_2}) / (\text{moles de gas seco} \cdot \text{PM de gas seco})$$

$$C_{p1 \text{ PROM DEL AIRE SECO EN LA ENTRADA}} C_{p \text{ PROMAE}} = 0.249 \quad \text{Kcal / Kg DE GAS SECO} \cdot ^\circ\text{K}$$

$$\text{CALOR LATENTE AGUA } \lambda^o = 597.200 \quad \text{Kcal/Kg a } 0^\circ\text{C}$$

(3) pag. 93

5.2.2.1. ENTALPÍA DEL GAS Ó AIRE EN LA ENTRADA AL SECADOR:

$$H_{G1} = (C_{p \text{ PROMAE}} + Y_1 \cdot C_{pm_{H_2O/PM_{H_2O}}}) (T_{G1} - t_1) + \lambda^o_{H_2O} Y_1$$

$$H_{G1} = 121.794 \quad \text{Kcal/Kg de gas seco}$$

$$\text{TEMPERATURA DEL AIRE DE SALIDA SE TOMARÁ } (T_{G2}) = 65.000 \quad ^\circ\text{C}$$

Cpm del aire en la salida

| COMPONENTE | $t_1 \quad ^\circ\text{C}$ | $t_{G2} \quad ^\circ\text{C}$ | CONSTANTES | | | Cpm Kcal/Kg mol ^o K |
|------------------|----------------------------|-------------------------------|------------|------------|-------------|-----------------------------------|
| | | | a | b | c | |
| O ₂ | 0.000 | 65.000 | 6.148 | 3.1020E-03 | -9.2300E-07 | 7.009 |
| N ₂ | 0.000 | 65.000 | 6.524 | 1.2500E-03 | -1.0000E-09 | 6.906 |
| CO ₂ | 0.000 | 65.000 | 6.214 | 1.0396E-02 | -3.5450E-06 | 9.058 |
| H ₂ O | 0.000 | 65.000 | 7.256 | 2.2980E-03 | 2.8300E-07 | 7.985 |

$$C_p \text{ PROM DEL AIRE SECO DE SALIDA} = (Y_{1O_2} C_{pM_{O_2}} + Y_{1N_2} C_{pM_{N_2}} + Y_{1CO_2} C_{pM_{CO_2}}) / (\text{moles de gas seco} * PM \text{ de gas seco})$$

$$C_p \text{ promedio del AIRE de salida } C_{pPROMAS} = 0.23987 \text{ Kcal / Kg DE AIRE SECO } ^\circ K$$

5.2.2.2. ENTALPÍA DEL GAS Ó AIRE EN LA SALIDA DEL SECADOR:

$$H_{G2} = (C_{pPROMAS} + C_{pM_{H_2O}}/PM_{H_2O} Y_2) (T_{G2} - 0) + \lambda_{H_2O} Y_2$$

DEJANDO H_{G2} EN FUNSIÓN DE Y_2 :

$$H_{G2} = 626.001 Y_2 + 15.591$$

CONSIDERANDO CALOR INTEGRAL DE HUMIDIFICACIÓN: $\Delta H_A = 0$

5.2.2.3. ENTALPÍA DEL SÓLIDO EN LA ENTRADA AL SECADOR:

ENTALPÍA DEL SÓLIDO HÚMEDO

$$H's = C_s(ts - t_o) + XCa(ts - t_o) + \Delta H_A \quad (2) \text{ pag.675}$$

$H's$ = entalpía del sólido húmedo en t_s , respecto al sólido y líquido a la temperatura de referencia t_o , energía / masa sólido seco.

C_s = Capacidad calorífica del sólido seco, energía / masa (temp)

Ca = capacidad calorífica de la humedad, como un líquido, energía / masa(temp)

ΔH_A = calor integral de humidificación con referencia al líquido y sólidos puros en t_o .

$$C_p H_2O_L = 1.000 \text{ Kcal/Kg}^\circ C$$

$$\text{TEMPERATURA DEL SÓLIDO EN LA ENTRADA} = 18.000 \text{ } ^\circ C$$

$$\text{TEMPERATURA SALIDA SÓLIDO} = 59.440 \text{ } ^\circ C$$

$$C_p \text{ del SÓLIDO} = a + b t + c t^2$$

| COMPONENTE | $t_o=t_1$ °C | $t_{s1}=t_2$ °C | CONSTANTES | | | Cpms Kcal/Kg $mol^\circ K$ |
|---------------------------------------|--------------|-----------------|------------|------------|-------------|-------------------------------|
| | | | a | b | c | |
| Fe ₂ O ₃ =Cpms1 | 0.000 | 18.000 | 24.720 | 1.6040E-02 | -4.2340E+05 | 23.927 |
| Fe ₂ O ₃ =Cpms2 | 0.000 | 59.440 | 24.720 | 1.6040E-02 | -4.2340E+05 | 24.914 |

(3) pag. 103

$$H_{s1} = C_{pms1} (t_{s1} - t_o) + X_1 C_{pH_2O_L} (t_{s1} - t_o) + \Delta H_A$$

$$H_{s1} = 10.440 \text{ Kcal/Kg de sólido seco}$$

5.2.2.4. ENTALPÍA DEL SÓLIDO EN LA SALIDA DEL SECADOR:

$$H_{s2} = C_{pms2} (t_{s2} - t_o) + X_2 C_{pH_2O_L} (t_{s2} - t_o) + \Delta H_A$$

$$H_{s2} = 9.672 \text{ Kcal/Kg de sólido seco}$$

5.2.3. PÉRDIDA DE CALOR EN EL TUBO:

SUPONIENDO UN DIÁMETRO DE SECADOR = 1.040 m
 ÁREA TRANSVERSAL DE SECADOR = 0.849 m²
 SUPONIENDO LA LONGITUD DEL SECADOR DE = 9.481 m
 ESPESOR DE AISLANTE LANA MINERAL Eais = 0.000 in

TEMPERATURA PROMEDIO DEL AIRE A LO LARGO DEL CUERPO DEL SECADOR $T = (T_{G1} - T_{amb}) + (T_{G2} - T_{amb}) / 2$

$$T = 211.345 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T = 211.345 \text{ } ^\circ\text{C} \longrightarrow T = 412.421 \text{ } ^\circ\text{F}$$

$$t_{amb} = 20.000 \text{ } ^\circ\text{C} \longrightarrow t_{amb} = 68.000 \text{ } ^\circ\text{F}$$

CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE LANA MINERAL Kc = 0.0330 BTU/h ft² °F/ft
 (5)

$$\text{DIÁMETRO DEL SECADOR } D_s = 1.040 \text{ m} \longrightarrow D_s = 40.945 \text{ in}$$

$$\text{PERÍMETRO} = 3.267 \text{ m}$$

$$\text{ÁREA POR PÉRDIDA DE CALOR} = 30.977 \text{ m}^2$$

SUPONEMOS UNA TEMPERATURA tsp (temperatura de superficie de la pared cilindro)

$$t_{sp} = 412.421 \text{ } ^\circ\text{F SUPUESTA} \quad 211.345 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_{sp} = t_{sp} - T_{amb} \quad T_{amb} = \text{temperatura ambiente}$$

$$\Delta t_{sp} = 344.421 \text{ } ^\circ\text{F}$$

CON ESTA ΔT_{sp} ENTRAMOS A LA GRÁFICA Y OBTENEMOS EL COEFICIENTE COMBINADO

DE CONVECCIÓN Y RADIACIÓN ha :

APÉNDICE C

$$h_a = 3.303 \text{ BTU/h ft}^2 \text{ } ^\circ\text{F}$$

DESPUES CALCULAMOS EL CALOR PERDIDO (5) pag 35

$$Q = 3.1416 * (T - T_{amb}) / (2.3 / (2 * k_c) * \text{LOG}((D_s + 2 * E_{ais}) / D_s) + 1 / (h_a * (D_s + 2 * E_{ais})))$$

$$Q = 12193.677 \text{ BTU/(h ft)} \quad 12196.677$$

CON EL CALOR PERDIDO CALCULADO SE CALCULA LA TEMPERATURA DE LA SUPERFICIE DEL CILINDRO

$$t_{sp\text{CALCULADO}} = (Q * (2.3 * \text{LOG}(D_s + 2 * E_{ais})) - (2 * 3.1416 * k_c * T)) / (2 * 3.1416 * k_c)$$

$$t_{sp\text{CALCULADO}} = 412.421 \text{ } ^\circ\text{F} \longrightarrow t_{sp\text{CALCULADO}} = 211.345 \text{ } ^\circ\text{C}$$

CUANDO tsp SEA IGUAL A tspCALCULADA SE OBTIENE EL CALOR PERDIDO POR EL CUERPO DEL SECADOR.

PÉRDIDA POR EL CUERPO DEL SECADOR $Q_p = 379276 \text{ BTU/h}$

$Q_p = 95578 \text{ Kcal/h}$ $Q_p = 26.549 \text{ Kcal/s}$

BALANCE DE MATERIA Y ENERGÍA EN EL SECADOR:

$$S_s (X_1 - X_2) = G_s (Y_2 - Y_1) \quad S_s (X_1 - X_2) = \text{AGUA EVAPORADA}$$

$$G_s = \text{AGUA EVAPORADA} / (Y_2 - Y_1) \dots\dots\dots 1$$

$$S_s H_{s1} + G_s H_{G1} = S_s H_{s2} + G_s H_{G2} + Q_p \dots\dots\dots 2$$

SUSTITUYENDO Y RESOLVIENDO SIMULTANEAMENTE 1 Y 2 SE OBTIENE G_s :

$$G_s = 0.7175 \text{ Kg DE AIRE SECO/S}$$

$$G_s = 0.0247 \text{ Kgmol DE AIRE SECO/S}$$

$$Y_2 = 0.1108 \text{ Kg de agua/Kg de aire seco}$$

$$H_{G2} = 84.9396 \text{ Kcal/Kg de gas seco}$$

COMPOSICIÓN DEL AIRE SECO EN LA ENTRADA Y SALIDA AL SECADOR

| COMPONENTE | MOLES ENTRADA | FRACCIÓN MOL | % |
|-------------|---------------|--------------|---------|
| Y_{1O_2} | 0.174690 | 0.1829 | 18.2910 |
| Y_{1N_2} | 0.763144 | 0.7991 | 79.9052 |
| Y_{1CO_2} | 0.017228 | 0.0180 | 1.8039 |

BASE 1 MOL DE AIRE ENTRANTE

5.2.4. COMPOSICIÓN DEL AIRE EN LA ENTRADA

| COMPONENTE | Kgmol | PM | KG | FRACCIÓN MOL |
|-------------|----------|-----------|----------|--------------|
| Y_{1O_2} | 0.004518 | 32.000000 | 0.144572 | 0.174685 |
| Y_{1N_2} | 0.019737 | 28.000000 | 0.552624 | 0.763120 |
| Y_{1CO_2} | 0.000446 | 44.000000 | 0.019604 | 0.017227 |
| Y_{1H_2O} | 0.001163 | 18.020000 | 0.020957 | 0.044968 |

$$\text{AIRE SECO} = 1 - Y_{1H_2O}$$

$$\text{AIRE SECO} = 0.955032 \text{ Kgmol DE AIRE SECO}$$

$$PM = 29.020 \text{ Kg / Kgmol DE AIRE SECO}$$

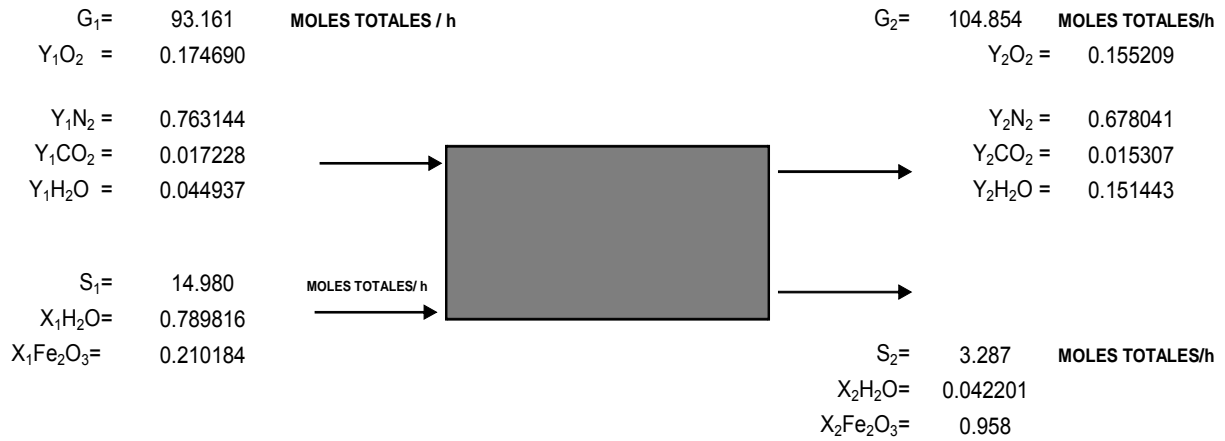
5.2.5. COMPOSICIÓN DEL AIRE EN LA SALIDA

| COMPONENTE | Kgmol | PM | Kg | FRACCIÓN MOL |
|-------------|----------|-----------|----------|--------------|
| Y_{2O_2} | 0.004518 | 32.000000 | 0.144572 | 0.155191 |
| Y_{2N_2} | 0.019737 | 28.000000 | 0.552624 | 0.677960 |
| Y_{2CO_2} | 0.000446 | 44.000000 | 0.019604 | 0.015305 |
| Y_{2H_2O} | 0.004412 | 18.020000 | 0.079499 | 0.151544 |

$$\text{AIRE SECO} = 0.848456 \text{ Kgmol DE AIRE SECO}$$

$$PM = 29.020 \text{ Kg / Kgmol DE AIRE SECO}$$

5.2.6. COMPROBACIÓN DE BALANCE DE MATERIA :



BALANCE GENERAL:

$$G_1 + S_1 = G_2 + S_2$$

ENTRADA $G_1 + S_1 = 108.141$ Kgmol / h

SALIDA $G_2 + S_2 = 108.141$ Kgmol / h

BALANCE DE AGUA:

$$G_1 * Y_1H_2O + S_1 * X_1H_2O = G_2 * Y_2H_2O + S_2 * X_2H_2O$$

ENTRADA $G_1 * Y_1H_2O + S_1 * X_1H_2O = 16.018$ Kgmol DE AGUA / h

SALIDA $G_2 * Y_2H_2O + S_2 * X_2H_2O = 16.018$ Kgmol DE AGUA / h

BALANCE DEL O_2 :

$$G_1 * Y_1O_2 = G_2 * Y_2O_2$$

ENTRADA $G_1 * Y_1O_2 = 16.2743$ Kgmol DE O_2 / h

SALIDA $G_2 * Y_2O_2 = 16.2743$ Kgmol DE O_2 / h

BALANCE DEL N_2 :

$$G_1 * Y_1N_2 = G_2 * Y_2N_2$$

ENTRADA $G_1 * Y_1N_2 = 71.0953$ Kgmol DE N_2 / h

SALIDA $G_2 * Y_2N_2 = 71.0953$ Kgmol DE N_2 / h

BALANCE DEL CO₂ :

$$G_1 * Y_{1CO_2} = G_2 * Y_{2N_2}$$

ENTRADA $G_1 * Y_{1CO_2} = 1.6050$ Kgmol DE CO₂ / h

SALIDA $G_2 * Y_{2N_2} = 1.6050$ Kgmol DE CO₂ / h

BALANCE DEL Fe₂O₃ :

$$S_1 * X_{1Fe_2O_3} = S_2 * X_{2Fe_2O_3}$$

ENTRADA $S_1 * X_{1Fe_2O_3} = 3.1487$ Kgmol DE Fe₂O₃ / h

SALIDA $S_2 * X_{2Fe_2O_3} = 3.1487$ Kgmol DE Fe₂O₃ / h

5.2.7. CÁLCULO DE LA TEMPERATURA DE BULBO HÚMEDO DEL GAS :

TEMPERATURA DE BULBO HÚMEDO EN EL PUNTO 1 (T_{G1}):

Temperatura del aire entrada (T_{G1}) = 397.7 °C

T_{BH1} calculada: 57.49 °C

PRESIÓN DE VAPOR DEL AGUA A TEMPERATURA DE BULBO HÚMEDO:

presión de vapor= 132.87 mmHg

HUMEDAD EN TEMPERATURA BULBO HÚMEDO

$$Y_W = P_v / (P_T - P_v) * (PM_{H_2O}) / (PM_{AIRE})$$

Y_W = 0.1874 Kg de agua / Kg de aire seco

CALOR LATENTE A LA T_{BH1} :

$$\lambda_W = 564.6313 \text{ KCAL / Kg a } T_{BH1} \text{ APÉNDICE B}$$

HUMEDAD DEL AIRE EN LA ENTRADA AL SECADOR:

Y₁= 0.0292 Kg de agua / Kg de aire seco

$$T_{G1}-T_{BH1} = \lambda_W (Y_W - Y_1) / CH_1$$

$$T_{G1}-T_{BH1} = 340.2 \quad 340.20 = \lambda_W (Y_W - Y_1) / CH_1$$

INCREMENTO T_{BH1} CALCULADA

$$(T_{G1}-T_{BH1}) - \lambda_W (Y_W - Y_1) / CH_1 = 0 \quad \text{NOTA: Con este incremento regresa a calcular } T_{BH1}$$

TEMPERATURA DE BULBO HÚMEDO EN EL PUNTO C (T_{GC}):

$$T_{GC} = 374.4 \quad ^\circ\text{C}$$

$$T_{BHA} = T_{BHC} \text{ calculada} = 56.51 \quad ^\circ\text{C}$$

PRESIÓN DE VAPOR DEL AGUA A TEMPERATURA DE BULBO HÚMEDO:

$$\text{presión de vapor} = 126.87 \quad \text{mmHg}$$

HUMEDAD EN TEMPERATURA BULBO HÚMEDO

$$Y_W = P_v / (P_T - P_v) (P_{M \text{ H}_2\text{O}}) / (P_{M \text{ AIRE}})$$

$$Y_W = 0.1765 \quad \text{Kg de agua / Kg de aire seco}$$

CALOR LATENTE A LA T_{BHC} :

$$\lambda_W = 565.21 \quad \text{KCAL / Kg} \quad \text{A } T_{BHC} \quad \text{APÉNDICE B}$$

$$\lambda_W = 2366.41 \quad \text{KJ / Kg}$$

HUMEDAD DEL AIRE EN LA ENTRADA AL SECADOR:

$$Y_1 = Y_C = 0.0292 \quad \text{Kg de agua / Kg de aire seco}$$

Cpm del AIRE EN EL PUNTO C

| COMPONENTE | $t_1 \quad ^\circ\text{C}$ | $t_{ec} \quad ^\circ\text{C}$ | CONSTANTES | | | Cpm Kcal/Kg $^{\circ}$ mol $^{\circ}$ K |
|------------------|----------------------------|-------------------------------|------------|------------|-------------|--|
| | | | a | b | c | |
| O ₂ | 0.000 | 374.400 | 6.148 | 3.1020E-03 | -9.2300E-07 | 7.369 |
| N ₂ | 0.000 | 374.400 | 6.524 | 1.2500E-03 | -1.0000E-09 | 7.099 |
| CO ₂ | 0.000 | 374.400 | 6.214 | 1.0396E-02 | -3.5450E-06 | 10.206 |
| H ₂ O | 0.000 | 374.400 | 7.256 | 2.2980E-03 | 2.8300E-07 | 8.377 |

$$C_{pC}^{\text{PROM DEL AIRE SECO EN EL PUNTO C}} = (Y_{1O_2} C_{pm1 O_2} + Y_{1N_2} C_{pm1 N_2} + Y_{1CO_2} C_{pm1 CO_2}) / (\text{moles de gas seco} * PM \text{ de gas seco})$$

$$C_{pC}^{\text{PROM DEL AIRE SECO EN EL PUNTO C}} = C_{pPROMAC} = 0.248 \quad \text{Kcal/Kg}^\circ\text{K}$$

$$\text{CALOR HÚMEDO } CH_C = C_{pPROMAC} + Y_C * C_{pm H_2O}$$

$$\text{CALOR HÚMEDO } CH_C = 0.262 \quad \text{Kcal/Kg de gas seco}^\circ\text{K}$$

$$T_{GC} - T_{BHC} = \lambda_W (Y_W - Y_C) / CH_C$$

$$T_{GC} - T_{BHC} = 317.93 - 317.93 = \lambda_W (Y_W - Y_C) / CH_C$$

INCREMENTO T_{BHC} CALCULADA

$$(T_{GC} - T_{BHC}) - \lambda_W (Y_W - Y_C) / CH_C = 0 \quad \text{NOTA: Con este incremento regresa a calcular } T_{BHC}$$

TEMPERATURA DE BULBO HÚMEDO EN EL PUNTO D (TGD):

$$T_{GD} = 67.5 \quad ^\circ\text{C}$$

$$T_{BHD} \text{ calculada} = 50.02 \quad ^\circ\text{C}$$

PRESIÓN DE VAPOR DEL AGUA A TEMPERATURA DE BULBO HÚMEDO:

$$\text{presión de vapor} = 92.60 \quad \text{mmHg}$$

HUMEDAD EN TEMPERATURA BULBO HÚMEDO

$$Y_W = P_v / (P_T - P_v) (PM_{H_2O}) / (PM_{AIRE})$$

$$Y_W = 0.1197 \quad \text{Kg de agua /Kg de aire seco}$$

CALOR LATENTE A LA T_{BHG} :

$$\lambda_W = 569.00 \quad \text{KCAL/Kg} \quad \text{A } T_{BHG} \quad \text{APÉNDICE B}$$

$$\lambda_W = 2382.29 \quad \text{KJ/Kg}$$

HUMEDAD DEL AIRE EN LA ENTRADA AL SECADOR:

$$Y_D = Y_2 = 0.1108 \quad \text{Kg de agua/Kg de aire seco}$$

Cpm del AIRE EN EN EL PUNTO D

| COMPONENTE | t ₁ °C | t _{GD} °C | CONSTANTES | | | Cpm Kcal/KgmoI°K |
|------------------|-------------------|--------------------|------------|------------|-------------|---------------------|
| | | | a | b | c | |
| O ₂ | 0.000 | 67.537 | 6.148 | 3.1020E-03 | -9.2300E-07 | 7.012 |
| N ₂ | 0.000 | 67.537 | 6.524 | 1.2500E-03 | -1.0000E-09 | 6.907 |
| CO ₂ | 0.000 | 67.537 | 6.214 | 1.0396E-02 | -3.5450E-06 | 9.068 |
| H ₂ O | 0.000 | 67.537 | 7.256 | 2.2980E-03 | 2.8300E-07 | 7.988 |

$$C_{pD} \text{ PROM DEL AIRE SECO EN EL PUNTO C} = (Y_{1O_2} C_{pm1 O_2} + Y_{1N_2} C_{pm1 N_2} + Y_{1CO_2} C_{pm1 CO_2}) / (\text{moles de gas seco} \cdot PM \text{ de gas seco})$$

$$C_{pD} \text{ PROM DEL AIRE SECO EN EL PUNTO C} = C_{pPROMAD} = 0.240 \text{ Kcal/Kg}^\circ\text{K}$$

$$\text{CALOR HÚMEDO } CH_D = C_{pPROMAD} + Y_D \cdot C_{PM H_2O}$$

$$\text{CALOR HÚMEDO } CH_D = 0.289 \text{ Kcal/Kg de gas seco}^\circ\text{K}$$

$$T_{GD} - T_{BHD} = \lambda_W (Y_W - Y_2) / CH_D$$

$$T_{GD} - T_{BHD} = 17.51 \quad 17.51 = \lambda_W (Y_W - Y_2) / CH_D$$

INCREMENTO T_{BHD} CALCULADA

$$(T_{GD} - T_{BHD}) - \lambda_W (Y_W - Y_2) / CH_D = 0 \text{ NOTA: Con este incremento regresa a calcular TBHD}$$

TEMPERATURA DE BULBO HÚMEDO EN EL PUNTO 2 (T_{G2}):

$$TG2 = 65.0 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$TBH2 \text{ calculada} = 49.85285025 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\text{presión de vapor} = 91.83355284 \text{ mmHg}$$

HUMEDAD EN TEMPERATURA BULBO HÚMEDO:

$$Y_W = P_v / (P_T - P_v) (PM H_2O) / (PM AIRE)$$

$$Y_W = 0.1185 \text{ Kg de agua /Kg de aire seco}$$

CALOR LATENTE A LA T_{BH2}:

$$\lambda_W = 569.0966 \text{ Kcal/Kg} \quad \text{A } T_{BH2} \text{ APÉNDICE B}$$

HUMEDAD DEL AIRE EN LA ENTRADA AL SECADOR:

$$Y_2 = 0.1108 \text{ Kg de agua/Kg de aire seco}$$

$$T_{G2}-T_{BH2} = \lambda_W (Y_W - Y_2) / CH_D$$

$$T_{G2}-T_{BH2} = 15.15 \quad 15.15 = \lambda_W (Y_W - Y_2) / CH_2$$

INCREMENTO T_{BH2} CALCULADA

$$(T_{G2} - T_{BH2}) - \lambda_W (Y_W - Y_2) / CH_2 = 0 \quad \text{NOTA: Con este incremento regresa a calcular } T_{BH2}$$

LA ENTALPÍA DEL SÓLIDO EN EL PUNTO A:

$$C_p \text{ del SÓLIDO} = a + b t + c / t^2$$

| COMPONENTE | t_1 | T_{BHA} | CONSTANTES | | | C_{psBH} |
|--------------------------------|-------|-----------|------------|------------|-------------|------------------------|
| | | | a | b | c | Kcal/Kg $mol^{\circ}C$ |
| Fe ₂ O ₃ | 0.000 | 56.512 | 24.720 | 1.6040E-02 | -4.2340E+05 | 24.850 |

SUPONIENDO QUE TODA LA HUMEDAD SE EVAPORA EN LA ZONA II Y A TEMPERATURA DE BULBO HÚMEDO,

$$T_{BHA} = 56.512 \quad ^{\circ}C \quad \text{y} \quad X_1 = 0.429 \quad \text{Kg de agua/Kg de sólido seco (PUNTO A)}$$

$$H_{SA} = C_{psBH} (t_{BHA} - t_1) + X_1 C_{pH_2O} (t_{BHA} - t_1) + H_A$$

$$H_{SA} = 33.108 \quad \text{Kcal/Kg de sólido seco}$$

LA ENTALPÍA DEL SÓLIDO EN EL PUNTO B:

$$C_p \text{ del SÓLIDO} = a + b t + c / t^2$$

| COMPONENTE | t_1 | T_{BHB} | CONSTANTES | | | C_{psBH} |
|--------------------------------|-------|-----------|------------|------------|-------------|------------------------|
| | | | a | b | c | Kcal/Kg $mol^{\circ}C$ |
| Fe ₂ O ₃ | 0.000 | 50.025 | 24.720 | 1.6040E-02 | -4.2340E+05 | 24.704 |

$$T_{BHB} = 50.025 \quad ^{\circ}C \quad \text{y} \quad X_2 = 0.005 \quad \text{Kg agua/Kg de sólido seco}$$

$$H_{SB} = C_{psBH} (t_{BHB} - t_1) + X_2 C_{pH_2O} (t_{BHB} - t_1) + H_A$$

$$H_{SB} = 8.073 \quad \text{Kcal/Kg de sólido seco}$$

5.2.8. CÁLCULO DEL PORCENTAJE DE PÉRDIDA DE CALOR EN CADA ZONA

La longitud o distancia del secador se divide en tres zonas, la ZONA I corresponde a la longitud necesaria para calentar el material a la temperatura de bulbo húmedo sin secado, la ZONA II corresponde a la longitud necesaria para secar el material y la ZONA III corresponde a la longitud necesaria para calentar el material de la temperatura de bulbo húmedo a la temperatura de salida del material.

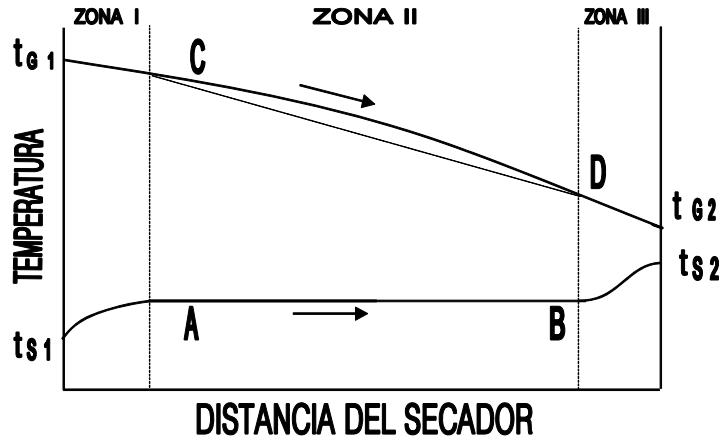
Suponiendo que las pérdidas de calor en las tres zonas son proporcionales al número de unidades de transferencia en cada zona y a la diferencia de temperatura promedio entre el gas y el aire que lo rodea:
(2)

| | | % TEMP | NTOG* %T | % DE PÉRDIDA |
|-------------------------------------|---|--------------------|----------|--------------|
| ZONA I | $t_{G1}-t_{amb} = 377.690$ $t_{GC}-t_{amb} = 354.443$ $(t_{G1}-t_{amb}) + (t_{GC}-t_{amb}) / 2 = 366.067$ | 0.597 | 0.015 | 0.0469323 |
| ZONA II | $t_{GC}-t_{amb} = 354.443$ $t_{GD}-t_{amb} = 47.537$ $(t_{GC}-t_{amb}) + (t_{GD}-t_{amb}) / 2 = 200.990$ | 0.328 | 0.303 | 0.9415757 |
| ZONA III | $t_{GD}-t_{amb} = 47.537$ $t_{G2}-t_{amb} = 45.000$ $((t_{GD}-t_{amb}) + (t_{G2}-t_{amb})) / 2 = 46.269$ | 0.075 | 0.004 | 0.0114920 |
| SUMATORIA DE TEMPERATURAS = 613.325 | | SUMATORIA NTOG*%T= | | 0.322 |

% DE PÉRDIDA DE CALOR

| | |
|----------|-----------|
| ZONA I | 0.0469323 |
| ZONA II | 0.9415757 |
| ZONA III | 0.0114920 |

Gradientes de temperatura en un secador a corriente paralela:



5.2.9. CÁLCULO ZONA I :

LA ZONA I SE VA A TOMAR COMO PRECALENTAMIENTO DEL SÓLIDO SIN SECADO.

t_1 = TEMPERATURA DE REFERENCIA

Cpm del AIRE en la entrada

| COMPONENTE | t_1 °C | t_{g1} °C | CONSTANTES | | | Cpm Kcal/Kgmo!°K |
|------------------|----------|-------------|------------|------------|-------------|---------------------|
| | | | a | b | c | |
| O ₂ | 0.000 | 397.690 | 6.148 | 3.1020E-03 | -9.2300E-07 | 7.394 |
| N ₂ | 0.000 | 397.690 | 6.524 | 1.2500E-03 | -1.0000E-09 | 7.114 |
| CO ₂ | 0.000 | 397.690 | 6.214 | 1.0396E-02 | -3.5450E-06 | 10.283 |
| H ₂ O | 0.000 | 397.690 | 7.256 | 2.2980E-03 | 2.8300E-07 | 8.407 |

$$C_{p1} \text{ PROM DEL AIRE SECO EN LA ENTRADA} = (Y_{1O_2} C_{pm1 O_2} + Y_{1N_2} C_{pm1 N_2} + Y_{1CO_2} C_{pm1 CO_2}) / (\text{moles de gas seco} \cdot \text{PM de gas seco})$$

$$C_{p1} \text{ PROM DEL AIRE SECO EN LA ENTRADA } C_{ppromae} = 0.249 \quad \text{Kcal/Kg}^\circ\text{K}$$

$$\text{CALOR HÚMEDO } CH_1 = 0.263 \quad \text{Kcal/Kg de gas seco}^\circ\text{K}$$

$$G_S CH_1 (T_{G1} - T_{GC}) = S_S (H_{SA} - H_{S1}) + \text{ZONA I } Q_p$$

T_{G1}-T_{GC} ES LA TEMPERATURA QUE BAJA EL AIRE PARA CALENTAR EL SÓLIDO A T_{BHA} Y PARA EL CALOR PERDIDO:

DESPEJANDO T_{GC}:

$$T_{GC} = 374.443 \quad ^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_G \text{ PARA CALENTAR EL SÓLIDO A } T_{BHA} = S_S (H_{SA} - H_{S1}) / (G_S CH_1)$$

$$\Delta T_G = 16.631 \quad ^\circ\text{C}$$

$$\text{DIFERENCIA DE TEMP. PROMEDIO ENTRE EL GAS Y EL SÓLIDO ES} = ((T_{G1} - T_{S1}) + (T_{GC} - T_{BHA})) / 2$$

$$\text{DIFERENCIA DE TEMP. PROMEDIO ENTRE EL GAS Y EL SÓLIDO ES} = 348.810 \quad ^\circ\text{C} = \Delta t_m$$

$$\text{NÚMERO DE UNIDADES DE TRANSFERENCIA DE CALOR} = N_{tOG} = \Delta t_g / \Delta t_m$$

$$N_{tOG} = 0.048 \quad (2) \text{ pag. 777-778}$$

5.2.10. CÁLCULO ZONA III :

$$CH_2 = C_{pPROMGS} + C_{pm2} H_2O Y_2$$

$$CH_2 = 0.289 \quad \text{Kcal/Kg de sólido seco}^\circ\text{K}$$

$$G_S (CH_2) (T_{G2} - T_{GD}) = S_S (H_{S2} - H_{SB}) + \text{ZONA III } Q_p$$

DESPEJANDO T_{GD} :

$$T_{GD} = 67.537 \quad ^\circ\text{C}$$

$$\Delta TG \text{ PARA CALENTAR EL SÓLIDO DE } T_{BHB} \text{ A } T_{S2} = S_S (H_{S2} - H_{SB}) / (G_S CH_2)$$

$$\Delta TG = 1.066 \quad ^\circ\text{C}$$

$$\text{DIFERENCIA DE TEMP. PROMEDIO ENTRE EL GAS Y EL SÓLIDO ES} = ((T_{G2} - T_{S2}) + (T_{GD} - T_{BHB})) / 2$$

$$\Delta T_m = 11.536 \quad ^\circ\text{C}$$

$$N_{tog} = \Delta TG / \Delta T_m$$

$$N_{tog} = 0.092 \quad (2)\text{pag.777-778}$$

5.2.11. CÁLCULO ZONA II :

$$CH_{\text{PROMEDIO}} = (CH_1 + CH_2) / 2$$

$$CH_{\text{PROMEDIO}} = 0.276 \quad \text{Kcal/Kg de gas seco}^\circ\text{K}$$

$$\text{CAMBIO REAL DE LA TEMPERATURA DEL GAS} = T_{GC} - T_{GD}$$

$$\text{CAMBIO REAL DE LA TEMPERATURA DEL GAS} = 306.906 \quad ^\circ\text{C}$$

$$\text{CAMBIO DE LA TEMP. COMO RESULTADO DE PÉRDIDA DE CALOR} = \text{ZONA III } Q_p / (G_S CH_{\text{PROMEDIO}})$$

$$\text{CAMBIO DE LA TEMP. COMO RESULTADO DE PÉRDIDA DE CALOR} = 126.358 \quad ^\circ\text{C}$$

$$\Delta TG \text{ RESULTANTE DE LA TRANSFERENCIA DEL CALOR AL SÓLIDO} = \text{CAMBIO REAL DE LA TEM} - \text{CAMBIO DE T POR PÉRDIDAS}$$

$$\Delta TG \text{ RESULTANTE DE LA TRANSFERENCIA DEL CALOR AL SÓLIDO} = 180.548 \quad ^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_m = ((t_{GC} - t_{BH}) - (t_{GD} - t_{BH})) / \ln ((t_{GC} - t_{BH}) / (t_{GD} - t_{BH}))$$

$$\Delta T_m = 103.631 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$N_{tog} = \Delta T_G / \Delta T_m$$

$$N_{tog} = 1.742$$

| | Ntog | % |
|----------|-------|-------|
| ZONA I | 0.048 | 0.026 |
| ZONA III | 1.742 | 0.926 |
| ZONA II | 0.092 | 0.049 |

$$N_{tog \text{ TOTAL}} = 1.882 \quad (2)\text{pag.777-778}$$

EXPRESANDO LOS FLUJOS COMO Kg DE SUSTANCIA SECA / m²

$$\text{ÁREA DEL TUBO} = 0.849 \text{ m}^2$$

$$G_s = 0.845 \text{ Kg/(m}^2 \text{ S)}$$

$$S_s = 0.163 \text{ Kg/(m}^2 \text{ S)}$$

$$Y_{av} = (Y_1 + Y_2) / 2$$

$$Y_{av} = 0.070 \text{ Kg de agua/ Kg de gas seco}$$

$$A_v G = G_s(1 + Y_{av}) = 0.904 \text{ Kg/(m}^2 \text{ S)}$$

$$U_a = (237 (A_v G)^{0.67}) / \text{DIÁMETRO DEL SECADOR}$$

$$U_a = 237 A_v G^{0.67} / D \quad (2)\text{pag.778}$$

$$U_a = 0.051 \text{ Kcal/ m}^3 \cdot ^\circ\text{K}$$

$$H_{tog} = G_s C_{H \text{ PROMEDIO}} / U_a$$

$$H_{tog} = 4.579 \text{ m}$$

$$\text{LONGITUD DEL SECADOR} = N_{tog} * H_{tog}$$

$$\text{LONGITUD DEL SECADOR} = 8.618 \text{ m}$$

5.2.12 HUMEDAD RELATIVA A LA SALIDA DEL SECADOR

HUMEDAD ABSOLUTA $Y = 1108.0000$ Kg AGUA/Kg DE AIRE SECO

HUMEDAD ABSOLUTA MOLAR $Y' = Y * PM \text{ GAS} / PM \text{ DEL AGUA}$

PRESIÓN TOTAL = P T = 574.000

$Y' = 0.178$ Kgmol de agua /Kgmol de aire seco

PRESIÓN PARCIAL= 86.901 mmHg presión parcial H₂O= $Y' * PT / (1 - Y')$

TEMPERATURA DE SALIDA= 65.000 °C

PRESIÓN VAPOR= 187.5476716 PRESIÓN DE VAPOR A LA TBS DE LA MEZCLA

HR= 46.33540852

5.2.13 TEMPERATURA DE ROCÍO A LA SALIDA DEL SECADOR

HUMEDAD EN LA SALIDA DEL SECADOR $Y_1 = 0.1108$ Kg AGUA/Kg DE AIRE SECO

PRESIÓN TOTAL = P T = 574.000

Presion parcial= 86.901 $P_v = P_T * Y_1 * PM \text{ GAS SALIDA} / 18.02 / (1 + Y_1 * PM_{GAS} / 18.02)$

TEMPERATURA DE ROCÍO = 51.011 °C temperatura tanteo

PV CALCULADA= 97.248 esta presión de vapor se compara con presión parcial de arriba
si no es igual la temperatura se cambia.

T SUPUESTA 55.00 °C

TEM ROCÍO 48.746 °C

PV= 86.903 86.901 =Presión parcial

diferencia Pv - Presión parcial Df= 0.000

Df/50= 0.000 Este valor se resta a la TEM ROCÍO

5.2.14 CÁLCULO DE REVOLUCIONES DEL SECADOR:

LOS SECADORES FUNCIONAN ENTRE 50 A 100 ft/min. (1) pag 20-40

RPM PARA 50 ft/min= 4.664 rpm MÍMIMAS

RPM PARA 100 ft/min= 9.329 rpm MÁXIMAS

5.2.15 CÁLCULO DEL GAS LP NECESARIO:

$$\text{DENSIDAD DEL GAS LP} = (\text{DENSIDAD PROPANO} * \% \text{PROPANO} + \text{DENSIDAD BUTANO} * \% \text{BUTANO}) / 100$$

$$\begin{aligned} \text{DENSIDAD del gas LP} &= 0.565 && \text{Kg de gas / litro de gas} \\ \text{Kgmol de gas} &= \text{Gs/PM} * 3600 / (\text{kgmol de gas seco/Kgmol de gas LP}) \end{aligned}$$

$$\text{PM GAS LP} = 53.800 \quad \text{Kg de gas LP / Kgmol de gas LP}$$

$$\text{GAS LP} = \text{Gs} / ((\text{Gs/Kg mol de gas LP}) * \text{PESO MOLECULAR PROM. DEL AIRE SECO}) * 3600$$

$$\text{CONSUMO DE GAS LP / h} = 0.43379 \quad \text{Kgmol de gas LP/h}$$

$$\text{CONSUMO DE GAS LP/h} = \text{GAS LP} * \text{PM GAS LP}$$

$$\text{CONSUMO DE GAS LP/h} = 23.338 \quad \text{Kg de gas LP/h}$$

$$\text{LITROS DE GAS LP/h PARA EL SECADO} = \text{CONSUMO DE GAS LP/h} * \text{DENSIDAD DEL GAS LP}$$

$$\text{LITROS DE GAS LP/h PARA EL SECADO} = 41.299 \quad \text{Litros de gas LP/h}$$

$$\text{GAS LP TOTAL} = 41.299 \quad \text{Litros de gas LP/h}$$

$$\text{PRECIO DEL GAS} = 4.664 \quad \text{PESOS/Litro de gas LP}$$

$$\text{COSTO DE SECADO/h} = 192.608 \quad \text{PESOS/h}$$

$$\text{COSTO DEL GAS P/SECAR/ Kg de producto} = 0.385 \quad \text{PESOS/Kg producto seco}$$

5.2.16 EFICIENCIA TÉRMICA:

$$\text{CALOR PRODUCIDO POR EL GAS} = \Delta H_{\text{Cr}^\circ} * \text{Kgmol de gas LP / h}$$

$$\text{CALOR PRODUCIDO POR EL GAS} = 277958.331 \quad \text{Kcal / h}$$

$$\text{CALOR PERDIDO POR CUERPO SECADOR} = 95577.441 \quad \text{Kcal / h}$$

$$\text{EFICIENCIA TÉRMICA} = 65.614 \quad \%$$

La eficiencia térmica de un secador rotatorio de calor directo para temperaturas elevadas de 1000 a 1500°F varía del 55-75%. (1) pag. 20-41

5.2.17. MASA VELOCIDAD DEL AIRE :

Kg de agua generada por la combustión= $\eta_{FH2OF} \times PM_{H2O} \times Kg_{mol\ gas\ LP}$

Kg de agua generada por la combustión= 36.739 **Kg de agua formada /h**

VELOCIDAD DEL AIRE = (Gs+agua que se evapora+agua del ambiente+agua por la combustión)/ÁREA TRANSVERSAL DEL SECADOR

VELOCIDAD DEL AIRE = 700.002 **lb/h ft²**

En general se puede utilizar con seguridad una velocidad de aire de 1000 lb / (h ft²)

(1)pag.20-41

5.2.18. KILOGRAMOS DE AIRE EN LA SALIDA DEL SECADOR:

Kg de aire seco + Kg de agua =Gs+AGUA QUE SE EVAPORA+AGUA DEL AMBIENTE+AGUA POR LA COMBUSTIÓN

Kg de aire seco + Kg de agua (W)= 2905.913 **Kg/h**

5.2.19. VOLUMEN DE AIRE EN LA SALIDA DEL SECADOR:

VOLUMEN DEL VENTILADOR= (Gs/PMGAS SECO+(AGUA EVAPORA+AGUA AMBIENTE+agua por la combustión)/18)*.082*TG2 / PT

VOLUMEN DEL VENTILADOR= 3850.094 **M³/h**

5.2.20. TIEMPO DE RESIDENCIA:

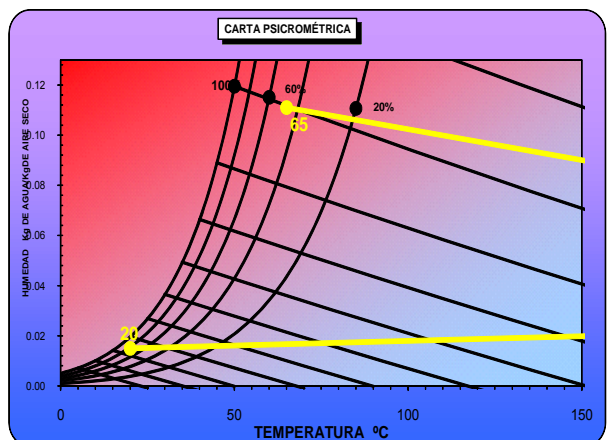
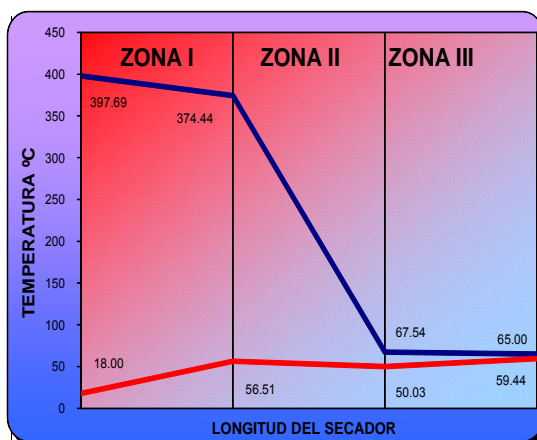
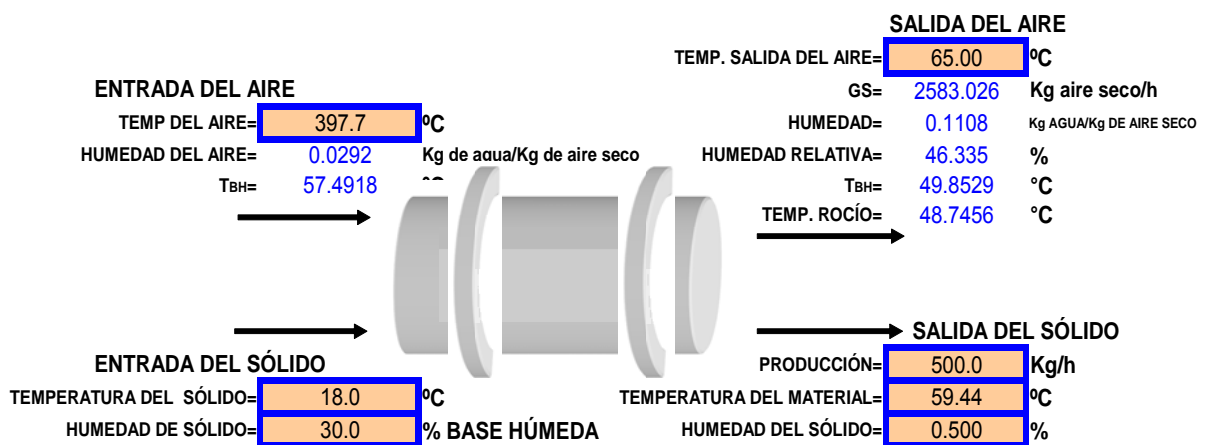
$$\theta = 0.23 L / (S N^{0.9} D) - 0.6 B L G / F \quad \text{FLUJO PARALELO}$$

(1) pag 20-40

| | | | | | |
|-----------------------------|------------------|---------|----------------------|--------|---------------------|
| Longitud del secador | L = | 9.481 | m | 31.104 | ft |
| Pendiente | S = | 0.011 | ft / ft | 10.0 | cm / L _T |
| Velocidad | N = | 4.664 | RPM | | |
| Diámetro del secador | D = | 1.040 | m | | |
| Tamaño de partícula | D _P = | 500.0 | MICRAS μ | | |
| Masa Velocidad del aire | G = | 700.002 | lb/h ft ² | | |
| Índice de alimentación | F = | 120.444 | lb/h ft ² | | |
| Tiempo de paso del material | θ = | 25.457 | min | | |

5.2.21. DATOS NECESARIOS PARA EL CÁLCULO DEL SECADOR

| | | |
|--|---------|-------------|
| TEMPERATURA AMBIENTE T_{amb} = | 20.0 | °C |
| TEMP. BULBO HÚMEDO DEL AMBIENTE $T_{BH\ amb}$ = | 17.0 | °C |
| PRESIÓN ATMOSFÉRICA (PT) = | 574.0 | mmHg |
| DIFERENCIA DE TEMPERATURA ENTRE EL GAS SALIDA Y PRODUCTO = | 5.56 | °C (2) |
| ESPESOR DE AISLANTE (LANA MINERAL) DEL SECADOR E_{ais} = | 0.0000 | in |
| DIÁMETRO DEL SECADOR D_s = | 1.040 | M |
| DICIEMBRE 2010 PESOS/ KW DE LUZ = | 3.100 | PESOS/KW |
| DICIEMBRE 2010 PESOS / LITRO DE GAS = | 4.664 | PESOS/LITRO |
| SUELDO POR PERSONA = | 150.000 | PESOS/DÍA |



APÉNDICE E

LONGITUD EN m EN CADA ZONA

| | FRACCIÓN PÉRDIDA DE CALOR | LONGITUD m | % N TOG |
|----------|---------------------------|------------|---------|
| ZONA I | 0.0469323 | 0.4044963 | 2.533 |
| ZONA II | 0.9415757 | 8.1151706 | 92.560 |
| ZONA III | 0.0114920 | 0.0990464 | 4.907 |

LONGITUD TOTAL = 8.619 m

5.2.22. RESULTADOS DE LOS CÁLCULOS

| | | | | |
|--|------------|-------------------------|----------------------------------|---|
| HUMEDAD DEL AMBIENTE= | 0.0149 | Kg AGUA/Kg DE AIRE SECO | | |
| Nt _{og} TOTAL = | 1.882 | | longitud para el cálculo= | 9.481 m |
| LONGITUD DEL CUERPO CALCULADO= | 8.619 | m | LONGITUD propuesta p/fabricación | 9.481 m |
| EVAPORACIÓN= | 210.709 | Kg AGUA/h | | |
| VELOCIDAD DEL AIRE DENTRO DEL SECADOR= | 700.002 | lb/h ft ² | 0.950 | Longitud fija = m |
| COSTO DEL GAS LP PARA SECAR= | 0.38522 | PESOS/Kg | | |
| CONSUMO DE GAS LP= | 41.299 | L/h | | |
| VOLUMEN DEL VENTILADOR= | 3850.094 | m ³ /h | velocidad aire = | 1.259 m/s del aire |
| VOLUMEN DEL VENTILADOR (FCM)= | 2266.080 | ft ³ /min | | 4.532 Km/h |
| CALOR SUMINISTRADO POR EL QUEMADOR= | 277958.331 | KCAL/h | | |
| CALOR PERDIDO POR EL CUERPO= | 95577.441 | KCAL/h | | |
| EFICIENCIA TÉRMICA= | 65.614 | % | | |
| rpm MÍNIMA= | 4.664 | | | |
| rpm MÁXIMA= | 9.329 | | | |

TUBERÍA DE SALIDA DE AIRE DEL SECADOR AL FILTRO

| | | | | |
|---|--|-------------------|---------------------|--------------------|
| DIÁMETRO TUBERÍA DE AIRE SALIDA (D) = | 12.0 | in | | |
| VISCOSIDAD DEL AIRE SALIDA (μ) = | 0.0196 | CENIPOISE | APÉNDICE D | |
| DENSIDAD DEL AIRE SALIDA (ρ) = | 0.754764 | Kg/m ³ | 0.04708 | lb/ft ³ |
| VELOCIDAD DEL AIRE SALIDA (v) = | 14.657 | m/s | | |
| NRE= | 1.720E+05 | | NRE= D v ρ / μ (11) | |
| No. CODOS 90° = | 1.0 | | | |
| COEFICIENTE DE RESISTENCIA (K) = | 2.328 | (11)pag A-49 | | |
| FACTOR DE FRICCIÓN (f) = | 0.0250 | OBTENER DATO | (11)pag A-42 - A-43 | |
| LONGITUD DE TUBERÍA= | 4.0 | m | | |
| ΔP= | 0.6253 K W ² / (D ⁴ ρ) | (11)pag 3-6 | | |
| ΔP= | 0.002 bar | | 0.758 IN DE AGUA | |

SELECCIÓN DEL TAMAÑO DEL VENTILADOR

Hp VENTILADOR AIRFOIL SQA PLUG FAN

VOLUMEN DEL VENTILADOR (FCM)= 2266.080 ft³/min

| TAMAÑO | 10 | 12 1/4 | 13 1/2 | 15 | 16 1/2 | 18 1/4 | 20 |
|---------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| rango de FCM | 1298 A 1770 | 1770 A 2992 | 2992 A 3638 | 3638 A 5016 | 5016 A 6360 | 6360 A 7800 | 7800 A 11700 |
| Hp VENTILADOR | 3.785 | 3.540 | 3.523 | 3.754 | 4.230 | 4.948 | 5.957 |

APÉNDICE E

TAMAÑO 12 1/4
Hp DEL VENTILADOR= 3.540 Hp VENTILADOR

5.2.23. COSTOS DE SECADO Y MOLIENDA

| | | | | |
|--|----------|----------|-------------|----------|
| | | | Hp MBW | \$/Kg |
| COSTO POR CONSUMO LUZ DEL VENTILADOR= | 0.01637 | PESOS/Kg | 9.519 | 0.04401 |
| COSTO POR MANO DE OBRA 2 TRABAJADORES= | 0.08571 | PESOS/Kg | | |
| COSTO DE GAS LP PARA SECADO= | 0.385216 | PESOS/Kg | | |
| COSTO DE LUZ PARA MOTOR TRANSMISIÓN SECADOR= | 0.034675 | PESOS/Kg | MOTOR 7.5HP | |
| COSTO DE LUZ PARA SOPLADOR DE CACAHUATE= | 0.046233 | PESOS/Kg | MOTOR 10HP | |
| COSTO DE LUZ PARA EL MOLINO= | 0.034675 | PESOS/Kg | MOTOR 7.5HP | |
| COSTO TOTAL = | 0.602879 | PESOS/Kg | | 0.630526 |

5.2.24. OPTIMIZACIÓN DEL SECADOR

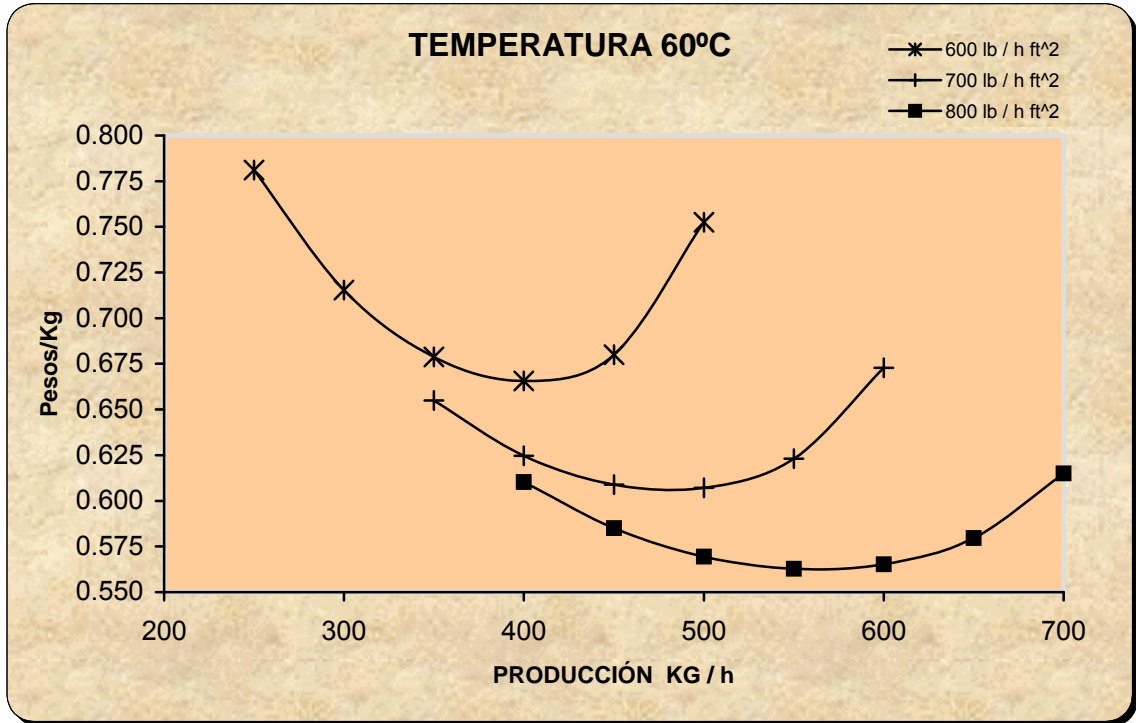
Se hicieron corridas de cálculo a diferentes capacidades del secador que van desde 200 a 650 Kg/h, variando la temperatura del gas de entrada, variando la masa velocidad del aire en el secador, manteniendo constante:

| | | | |
|--|----------|--------------|----------------------|
| TEMPERATURA AMBIENTE T_{amb} | = | 20 | °C |
| TEMP. BULBO HÚMEDO DEL AMBIENTE $T_{BH\ amb}$ | = | 17 | °C |
| PRESIÓN ATMOSFÉRICA (PT) | = | 574 | mmHg |
| DIFERENCIA DE TEMPERATURA ENTRE EL GAS SALIDA Y PRODUCTO | = | 5.56 | °C |
| ESPESOR DE AISLANTE (LANA MINERAL) DEL SECADOR E_{ais} | = | 0 | in |
| DIÁMETRO DEL SECADOR D_s | = | 1.04 | M |
| PESOS/ KW DE LUZ | = | 3.10 | PESOS/KW |
| PESOS / LITRO DE GAS | = | 4.664 | PESOS/LITRO |
| SUELDO POR PERSONA | = | 150 | PESOS/DÍA |
| HUMEDAD DEL SÓLIDO ENTRADA | = | 30 | % BASE HÚMEDA |
| HUMEDAD DEL SÓLIDO SALIDA | = | 0.5 | % BASE HÚMEDA |

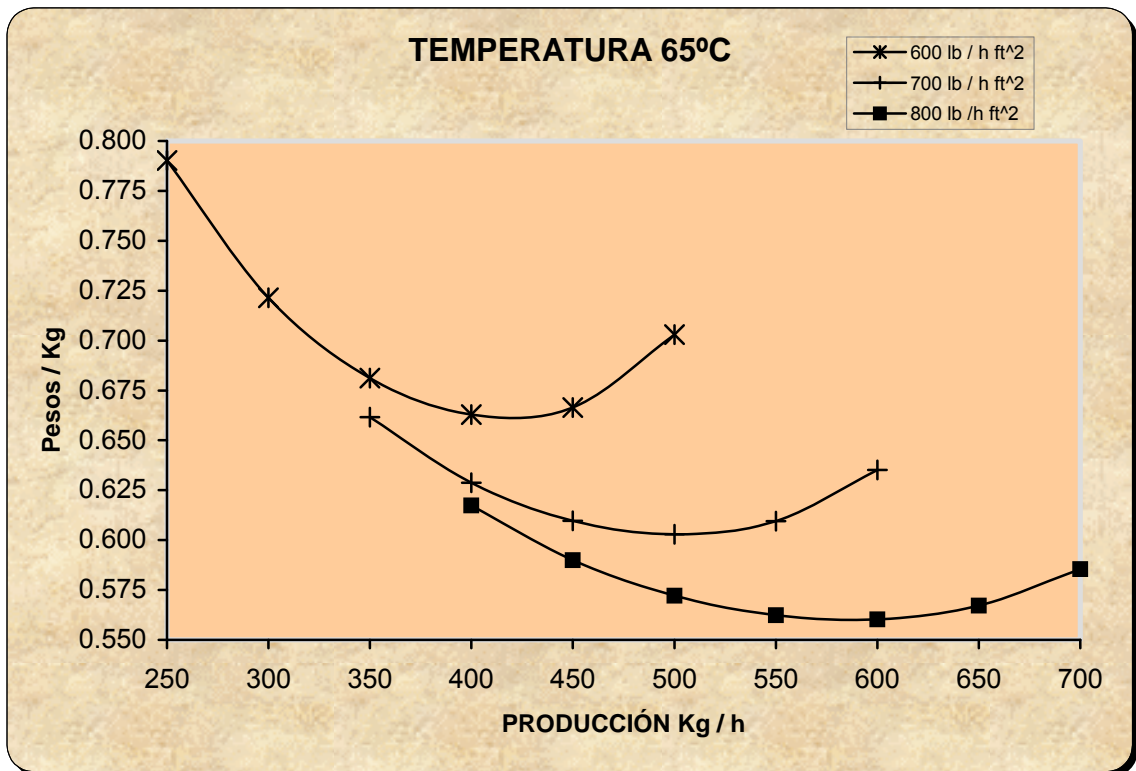
El diámetro lo consideramos constante ya que la compañía cuenta con 5 cilindros de acero al carbón SA-285C de 1.04m de diámetro, 1.90m de longitud y $\frac{1}{4}$ de espesor, el espesor es ideal para un secador de un metro de diámetro, porque antes de la fabricación del secador tuve la oportunidad de ver funcionando dos secadores, uno con un espesor de $\frac{1}{8}$ " y el otro de $\frac{1}{4}$ ", de 8m y 10m de largo respectivamente.

La diferencia de temperatura entre el gas de salida del secador y temperatura de salida del producto se tomo de 5.56°C , porque así se encuentra en los datos típicos de funcionamiento de secadores rotatorios de calor directo y corriente paralela.⁽¹⁾

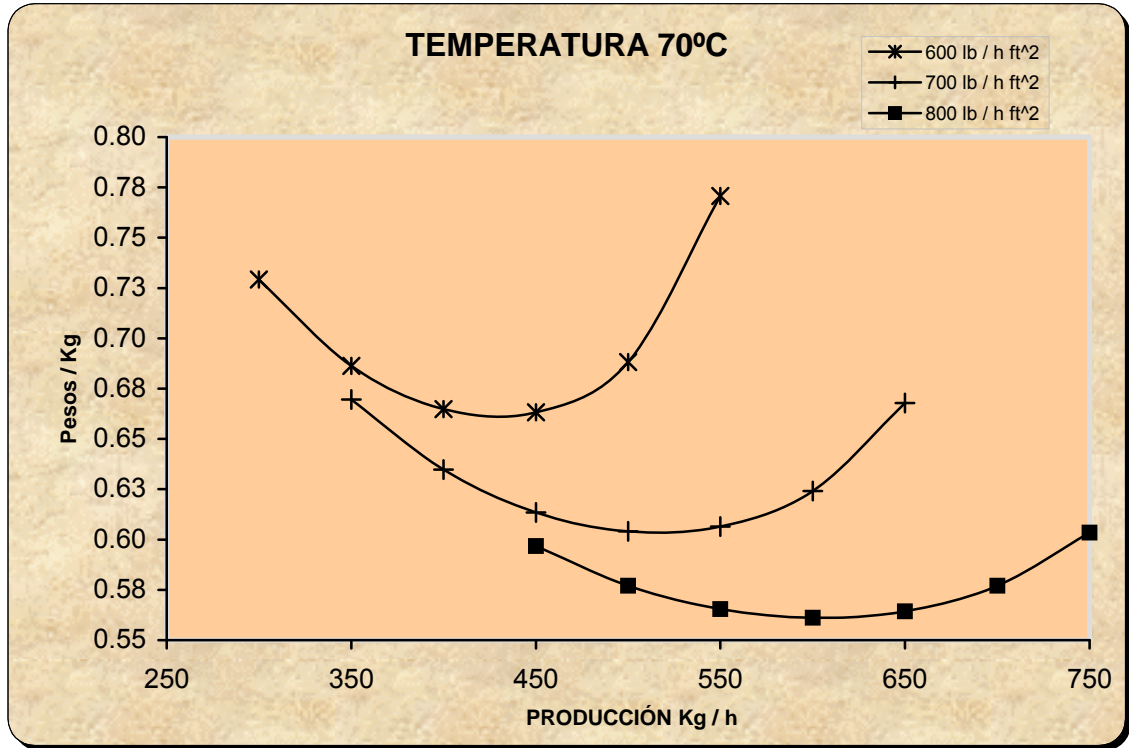
En las tablas No. 5, 6, 7 y 8, están los datos obtenidos de los cálculos a diferentes temperaturas del gas de salida del secador, observamos que al aumentar la masa velocidad del gas de 600 a 800 lb/h ft² en cada una de las tablas el costo baja y la producción aumenta, como podemos verlo en las gráficas 5, 6, 7 y 8, pero a mayor masa velocidad hay mayor arrastre de polvo. La masa velocidad del aire segura para evitar el espolvoramiento de los datos típicos de funcionamiento de secadores rotatorios de calor directo y corriente paralela, es de 1000 lb/h ft².⁽¹⁾



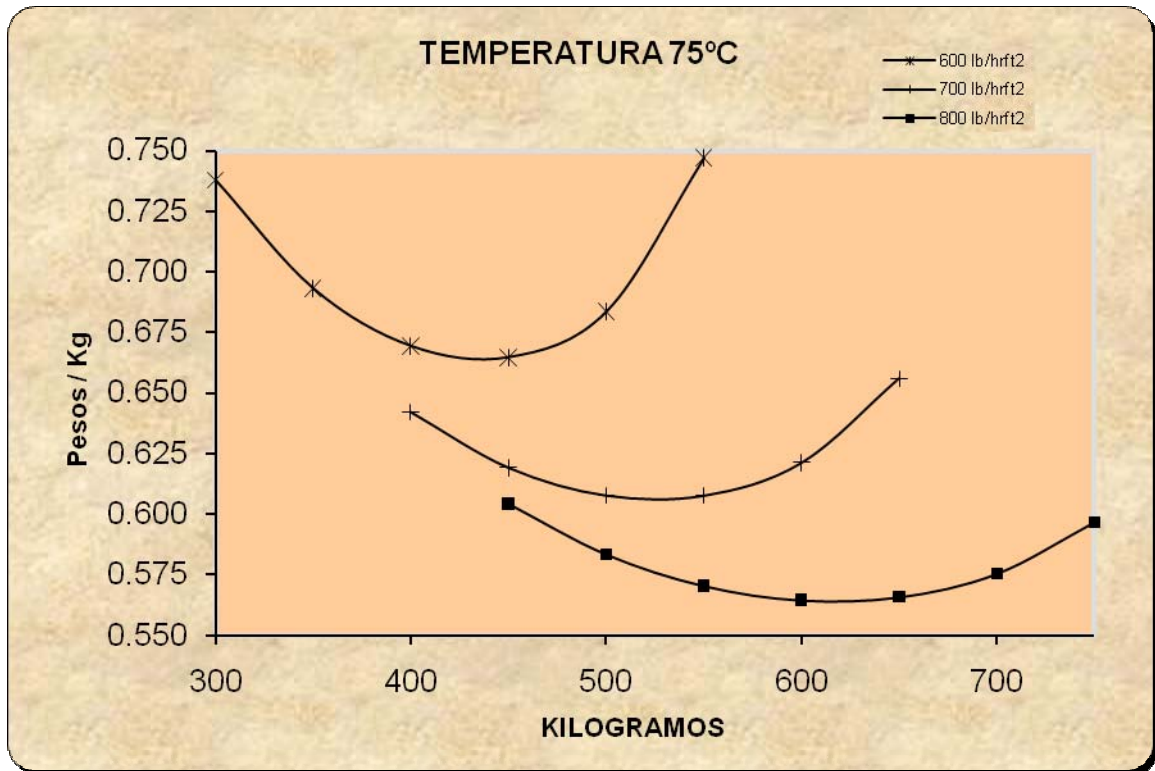
GRÁFICA No.5
COSTO TOTAL DE SECADO EN FUNCIÓN DE LA PRODUCCIÓN



GRÁFICA No.6
COSTO TOTAL DE SECADO EN FUNCIÓN DE LA PRODUCCIÓN



GRÁFICA No.7
COSTO TOTAL DE SECADO EN FUNCIÓN DE LA PRODUCCIÓN



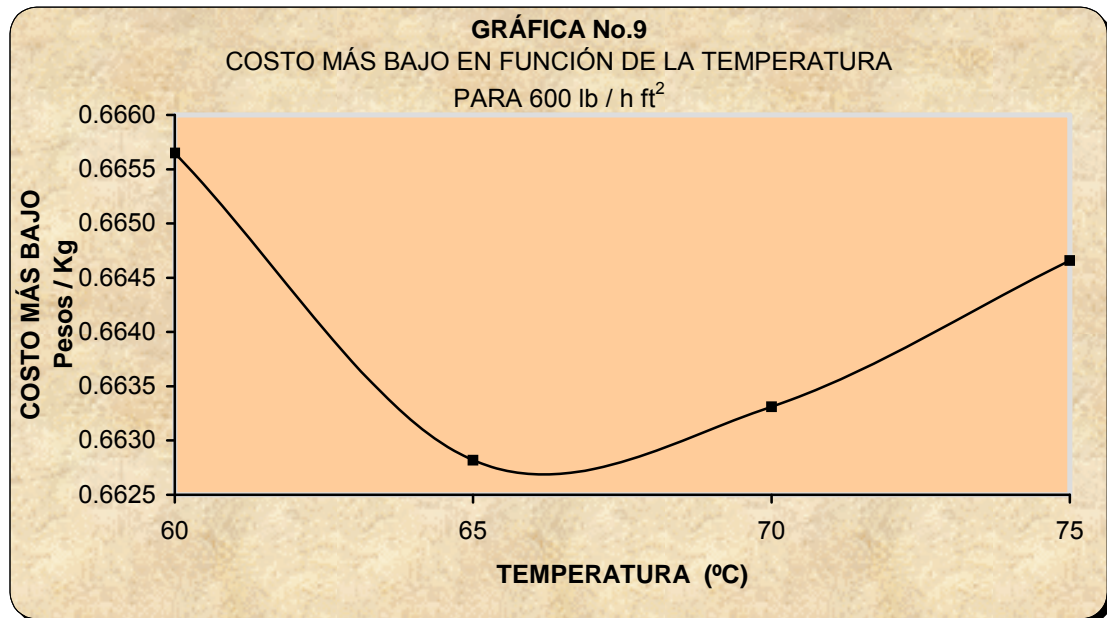
GRÁFICA No.8
COSTO TOTAL DE SECADO EN FUNCIÓN DE LA PRODUCCIÓN

En la gráfica 9 la masa velocidad de 600 lb/h ft² en función de la temperatura de gas de salida, observamos que el costo más bajo se encuentra a una temperatura de 66°C, también a esta temperatura es el costo más bajo para la masa velocidad de 700 lb/h ft² y 800 lb/h ft². Como se muestra en las gráficas 10 y 11.

Entonces la temperatura de salida del aire de 66°C es ideal para un secador de 1.04m de diámetro, a cualquier masa velocidad de aire.

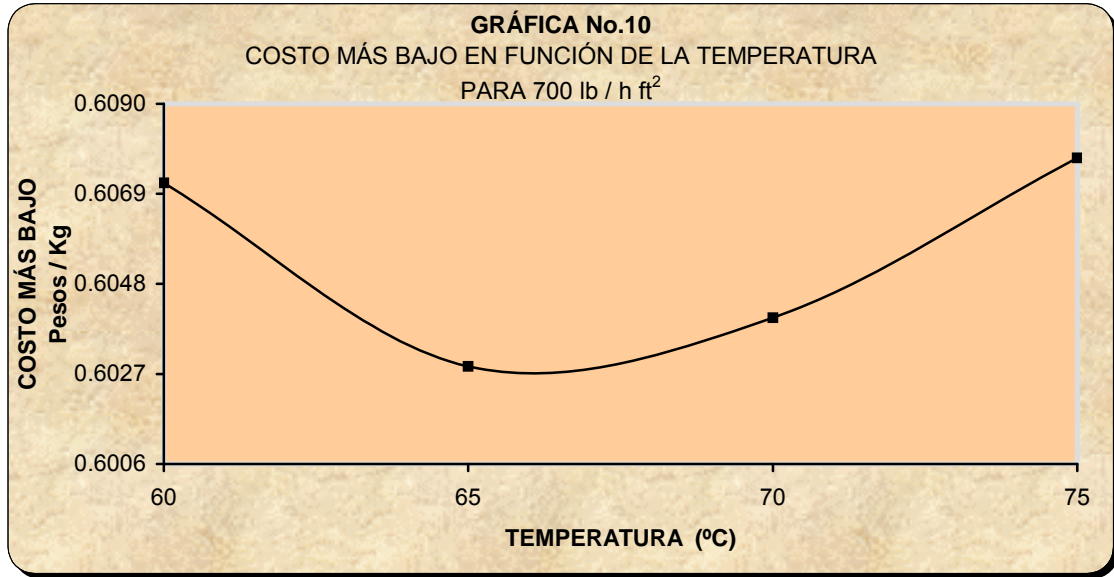
Datos para la gráfica No. 9

| TEMPERATURA | COSTO MÁS BAJO |
|-------------|----------------|
| 60 | 0.665649 |
| 65 | 0.662820 |
| 70 | 0.663310 |
| 75 | 0.664658 |



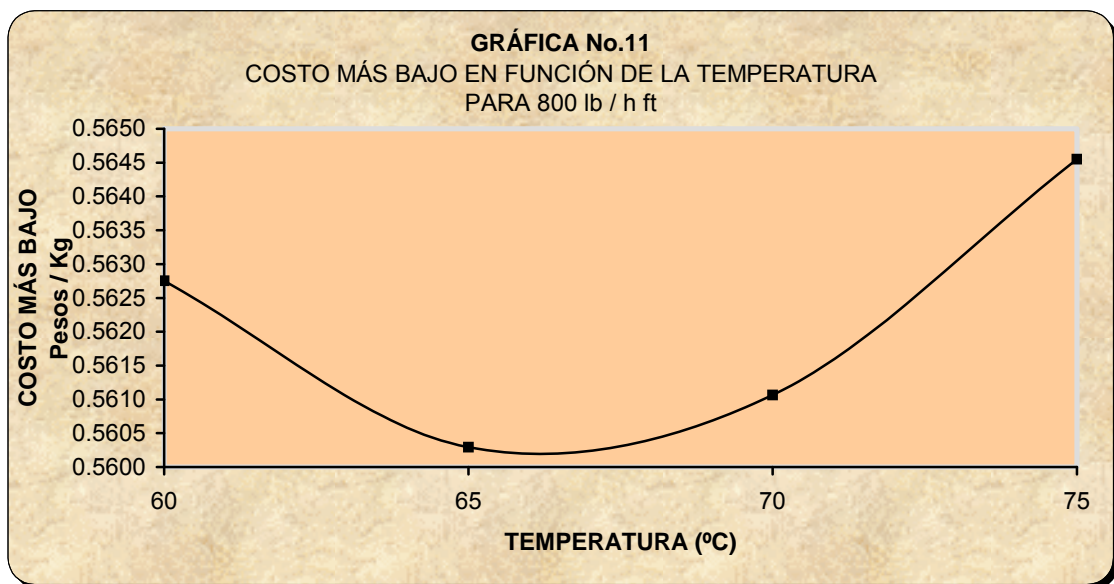
Datos para la gráfica No. 10

| TEMPERATURA | COSTO MAS BAJO |
|-------------|----------------|
| 60 | 0.607155 |
| 65 | 0.602880 |
| 70 | 0.604009 |
| 75 | 0.607741 |



Datos para la gráfica No.11

| TEMPERATURA | COSTO MAS BAJO |
|-------------|----------------|
| 60 | 0.562754 |
| 65 | 0.560291 |
| 70 | 0.561062 |
| 75 | 0.564550 |



Fijando la velocidad del gas a 700 lb/h ft^2 , que corresponde a un 30% abajo de la velocidad recomendada, para una temperatura de gas de salida de 65°C es el costo más bajo, con una longitud del secador de 9.48m, una producción de 500 Kg/h, un volumen de gas de $2,266.08 \text{ ft}^3/\text{min}$ a la temperatura del gas de salida de 65°C , gráfica No.10.

SIGNIFICADO DE LOS TÍTULOS DE LAS TABLAS 5, 6, 7 Y 8.

PRODUCCIÓN

Es la cantidad de material seco que sale del secador con una humedad de 0.5% base húmeda.

TEMPERATURA DEL PRODUCTO

Es la temperatura del material al final del secador, esta temperatura se obtuvo como la diferencia de temperatura entre el gas de salida y la temperatura del producto de 5.56°C . (1) pag. 20-40

TEMPERATURA DE ROCÍO

Es la temperatura de rocío del gas de salida.

N_{TOG}

Número de unidades de transferencia de calor, se ha descubierto que los secadores rotatorios son más económicos cuando funcionan entre $1.5 < N_{\text{TOG}} < 2.5$. (1) PAG. 20-40

VELOCIDAD DEL GAS

La masa velocidad del aire segura para evitar el espolvoramiento de los datos típicos de funcionamiento de secadores rotatorios de calor directo y corriente paralela, es de 1000 lb/h ft^2 con sólidos de malla 35(1).

COSTO DE SECADO

Corresponde sólo al costo del gas LP para secar un Kg de producto a la humedad deseada.

Hp VENTILADOR

Es la potencia requerida para mover el flujo de aire a una presión hidrostática de 7 in de H₂O, es importante mencionar que hay que hacer corrección de temperatura y altitud. Este dato se utilizó sin hacer esta corrección porque desconocemos la caída de presión en el filtro de lonas.

TAMAÑO DEL VENTILADOR

Es el tamaño del ventilador marca CHICAGO BLOWER modelo SQA para manejar el flujo del aire necesario para el secador a temperatura ambiente y a 1 atm.

COSTO TOTAL

Corresponde al costo de mano de obra, consumo de luz por el soplador de cacahuete para el transporte de material seco que sale del molino de martillos hacia filtro del molino, consumo de luz por el ventilador del secador, costo del gas LP para secar un Kg de producto a la humedad deseada, consumo de luz del motor para el cuerpo del secador.

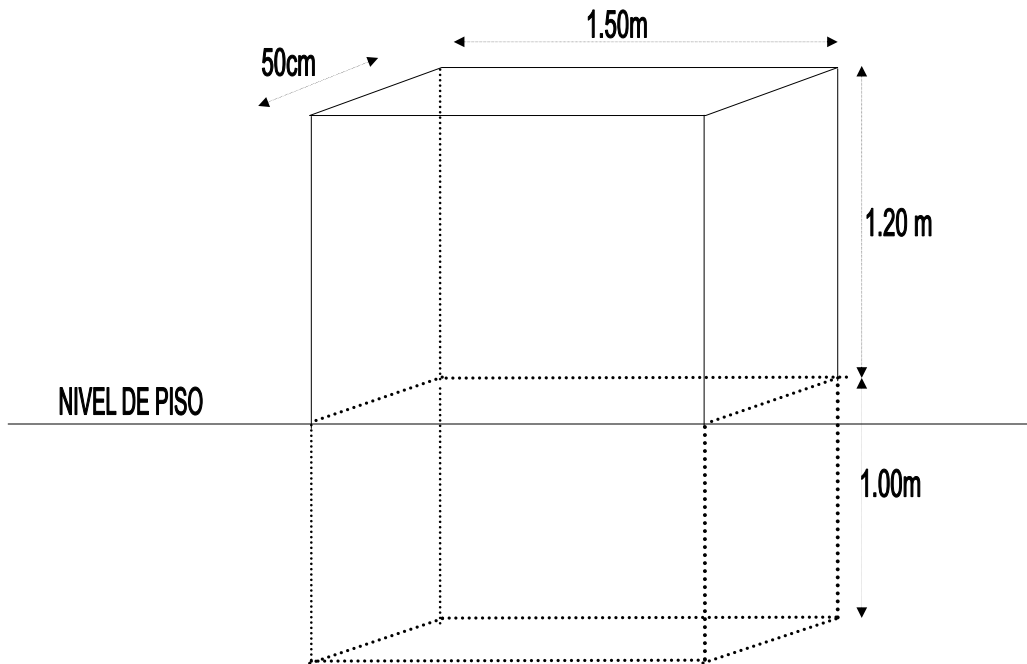
6. FABRICACIÓN DE SECADOR

6.1. CUERPO Y BASE DE SECADOR

Con los datos obtenidos del cálculo, se empezó la fabricación del secador, con un diámetro de 1.04m y una longitud de 9.5m, este cuerpo se fabricó con 5 cilindros de 1.04m de diámetro, una longitud de 1.9m, y un espesor de $\frac{1}{4}$ " , material de acero al carbón, con un peso aproximado a 310.4 Kg c/u (densidad del hierro = 7.874 g/cm^3), el peso total del cuerpo del secador es de 1,552 Kg.

Estos cilindros se soldaron alineándolos uno a uno, procurando penetrar la soldadura mayor o igual a $\frac{1}{8}$ " , para que quede perfectamente soldado por ambos lados.

Después de formar el cuerpo del secador, se empezaron hacer dos bases de concreto para soportar 1,552Kg del cuerpo del secador, más el peso de las rodajas, el peso del material a lo largo del cuerpo del secador, el peso de espas y la vibración que generaría en su trabajo, estas bases tuvieron que ser suficientemente fuertes para este esfuerzo, se hicieron en el piso dos agujeros con una profundidad de 1.0m y un ancho de 50 cm, separados entre sí de 4.25m, antes de rellenarlas de concreto se reforzaron con varilla y anillos de $\frac{3}{8}$ " , hasta la altura de 1.20m sobre el nivel de piso, dejando 8 tornillos de 50cm de largo y 1" de diámetro anclados al concreto para atornillar las rodajas donde asentaría el secador, la altura de la base de 1.20m se calculó en función de la caja de humo y el molino de martillos que se pondría debajo, las dimensiones de la base se muestra en la siguiente figura:



Las ruedas de hierro están diseñadas para poder mover la inclinación del cilindro del secador, las ruedas se encuentran en una base de hierro macizo y se pueden acercar y alejar, al separarse entre ellas el cilindro bajaría, al juntarse el cilindro subiría.

Se colocaron las aspas de elevación, dentro del cuerpo del secador, la altura de la aspa radial en un secador directo varía de 1/12 a 1/18 del diámetro del secador⁽¹⁾ :

$$\text{Diámetro} = 1.04 \text{ m} = 40.94 \text{ in}$$

$$\text{Altura de aspa mínimo} = 40.94/18 = 2.27 \text{ in}$$

$$\text{Altura de aspa máximo} = 40.94/12 = 3.41 \text{ in}$$

Número de aspas: el número de aspas oscila de 2D a 3D, siendo

D = diámetro en ft⁽¹⁾.

$$\text{Diámetro} = 1.04\text{m} = 3.41 \text{ ft}$$

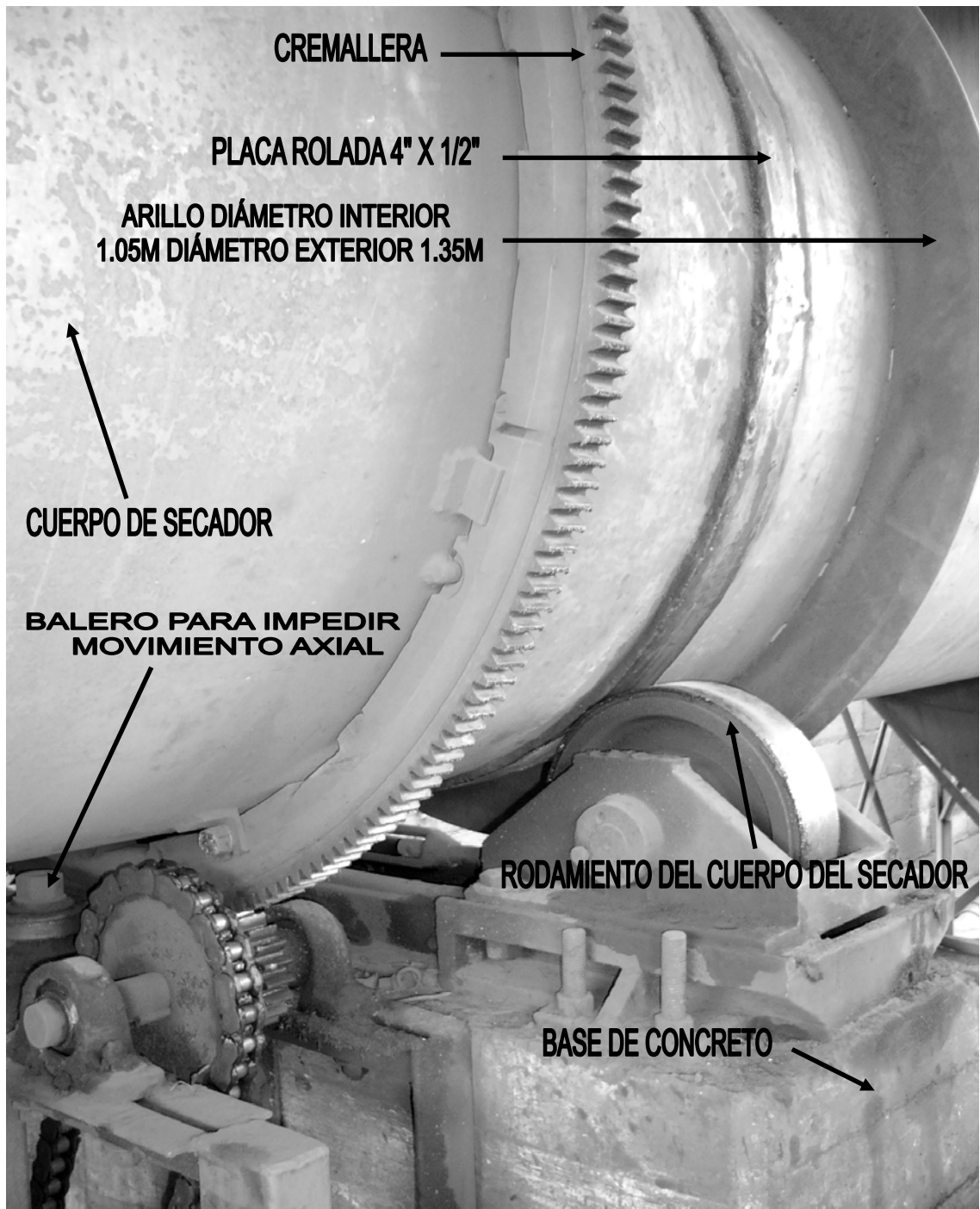
El número de aspas mínimo = $2 * 3.41 = 6.82$

El número de aspas máximo = $3 * 3.41 = 10.23^{(1)}$

Se colocaron 8 aspas de 3" por 1/4", ya que estos valores se encuentran dentro del rango recomendado, dejando al final del secador un espacio de 0.86m (10%) sin aspas para disminuir el arrastre de sólido, quedando el cuerpo del secador de 8.64 m, esta distancia dividiéndola en tres secciones, quedan de 2.88 m, en la primera sección se colocaron aspas planas, los primeros 40 cm con aspas curvas para mover el material con mayor rapidez hacia el interior del secador, la segunda sección se colocaron aspas a 45° y la última sección se colocaron aspas a 90°⁽¹⁾. El peso total aproximado de aspas es 263Kg.

Después se colocó al inicio del secador un arillo de hierro de 1.03m de diámetro exterior, 0.74m diámetro interior y un espesor de 1/4", para impedir que el material que se introduce salga y además para ayudar a la circunferencia del cilindro que sea lo más perfecta posible.

Enseguida se colocó la cremallera de 1.20 m de diámetro por 2" de ancho, esta cremallera no se fijo en ese momento con tornillos ya que se decidió esperar a subir el cilindro para fijarla en el lugar deseado. Se soldó una placa rolada de 1.04m por 4" ancho y 1/2" de espesor como asiento para cada rueda para impedir que el cuerpo del secador se desgaste con el trabajo, a los 25 cm de estos asientos, se instaló un arillo de 1.05m de diámetro interior y 1.35m de diámetro exterior, para reforzar el cuerpo, obligarlo a tener una circunferencia perfecta y disminuir el brincoteo del cuerpo cuando esté trabajando.



6.2. CÁLCULOS DE LA TRANSMISIÓN

Velocidad periférica recomendada esta entre 50-100 ft/min entonces:

Díámetro del cuerpo del secador $1.04\text{m} = 104\text{ cm}$

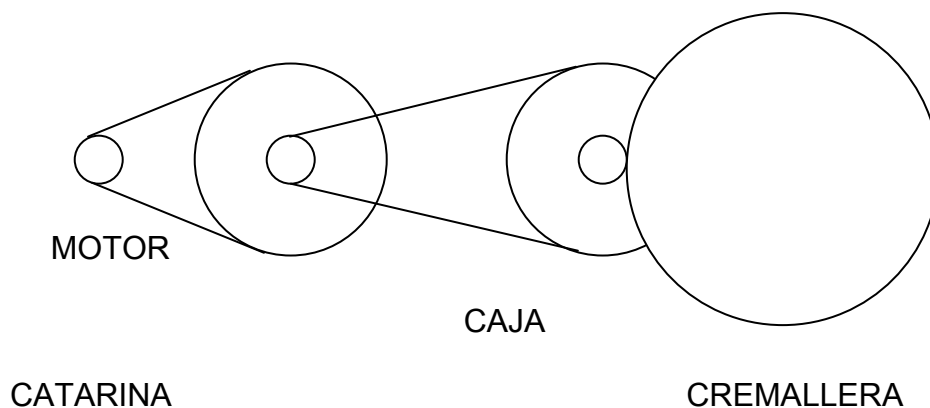
Perímetro del cuerpo del secador $p = 104 * 3.1416 = 326.72$

cm/Rev $P = 0.7193\text{ ft/Rev}$

RPM mínimas $\text{RPM} = 50\text{ ft/min} / 0.7193 = 4.66\text{ rpm}$

RPM máximas $\text{RPM} = 100\text{ft/min} / 0.7193 = 9.32\text{ rpm}$

Se utilizó una caja de velocidades automotriz para tener flexibilidad en la velocidad en el cuerpo del secador, tomaremos la primera velocidad de la caja como las RPM mínima y la segunda velocidad como RPM máxima.



Hay que encontrar la relación de cada una de las etapas, tomando en cuenta las medidas comerciales de poleas y catarinas para obtener las revoluciones deseadas del cuerpo del secador, en la primera etapa de motor a caja banda en "B", en la segunda etapa cadena paso 80 y en la tercera etapa engrane y cremallera.

Datos:

Motor 1715 RPM, 4 polos

Relación de caja: primera 6.4: 1

Segunda 3.09: 1

Relación de engrane a cremallera:

Diámetro de cremallera 117.5 cm

Diámetro de engrane 3.5" = 8.89 cm

Relación engrane a cremallera 13.217 : 1

Para las revoluciones por minuto del cuerpo del secador de 9.32 RPM, fijamos la segunda velocidad de la caja, necesitamos la polea más pequeña que le quede a la flecha del motor de 7.5 Hp, que en este caso es de 3" y fijando también la polea para la entrada de la caja que no sea tan grande, será de 8".

POR EL LADO DEL MOTOR:

Motor 1715 RPM relación motor a caja = $8 / 3 = 2.66 : 1$

RPM entran a caja = $1715 / 2.66 = 643.14$ RPM

RPM salen de la caja = $643.14 / 3.09 = 208.13$ RPM

POR EL LADO DE LA CREMALLERA:

RPM del cuerpo del secador 9.32 RPM

RPM del engrane de 3.5" = $9.32 * 13.217 = 123.18$ RPM

Entonces la relación de catarinas = RPM que salen de caja/RPM de engrane 3.5"

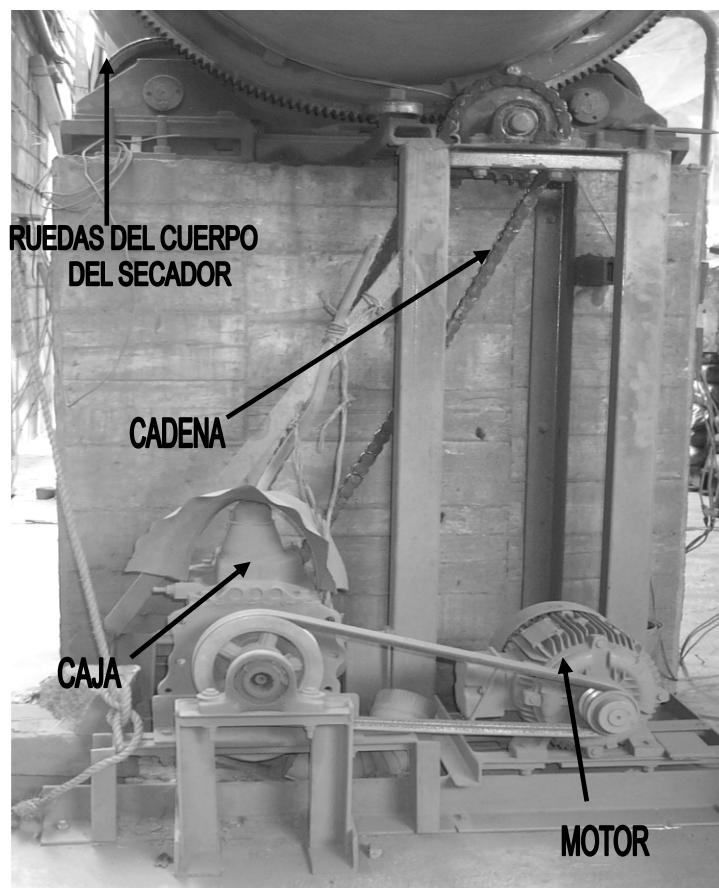
Relación de catarinas = $208.13 / 123.18 = 1.6896$

Si suponemos que la catarina de la caja sea de 14 dientes entonces la catarina del lado del engrane:

$$\text{Dientes de catarina de engrane} = 14 * 1.6896 = 23.52$$

Entonces catarina comercial de engrane = 24 dientes paso 80.

Se acopla el motor de 7.5 Hp 4 polos con una caja de velocidades por medio de dos bandas en B, en una base de hierro formada con ángulo de $1 \frac{1}{2}$ " x $\frac{1}{4}$ " de espesor, para el motor, dejando agujeros alargados en la base de hierro para poder tensar la banda, toda la estructura de la transmisión se fijó al piso y a la base del secador y quedó como se muestra en la siguiente imagen:



6.3. POTENCIA NECESARIA PARA TRANSMISIÓN

La potencia total requerida para mover un secador rotatorio con aspas se calcula aplicando la siguiente formula:

$$\text{Potencia (Hp)} = \frac{N (4.75 d w + 0.1925 DW + 0.33 W)}{100,000}$$

- N Velocidad de rotación (RPM)
- d Diámetro del cuerpo (ft)
- w Carga de material (lb)
- D Diámetro donde asienta el secador (ft)
- W carga total (cuerpo y material) (lb)

$$N = 9.32 \text{ rpm}$$

$$d = 1.04\text{m} = 3.41\text{ft}$$

$w = 1210.5 \text{ l} * 1.3473\text{Kg/l} = 1630.9\text{Kg} = 3592.3 \text{ lb}$. Se considera el 15% del volumen del cuerpo.

$$D = 1.04\text{m} + 0.05\text{m} = 1.09\text{m} = 3.57\text{ft}$$

$$W = 1552\text{Kg cuerpo} + 263.3\text{Kg aspas} + 1630.9\text{Kg material} = 3446.2\text{Kg} \\ = 7590.74\text{lb}$$

Potencia (Hp) = 5.93, el motor que se pone es de 7.5 Hp.

6.4. CAJA DE HUMO

La fabricación de la caja de humo tiene que ser de una área transversal mayor que la del cuerpo del secador para que el polvo baje su velocidad y disminuir su arrastre al filtro de lonas.

$$\text{Área del cilindro} = \text{PI} * D^2 / 4 = .85 \text{ m}^2$$

La caja de humo la hicimos con un 50% más de área transversal.

$$\text{Área de la caja de humo} = 0.85 * 1.5 = 1.275 \text{ m}^2.$$

Fijando el ancho a 1.30m ya que el cuerpo del secador es de 1.04m, dejando 15cm por lado, obtenemos el largo de:

Largo de la caja de humo $= 1.275 / 1.3 = 98 \text{ cm}$, se hizo de 1.0m y quedaría el Área transversal de la caja de humo $= 1.3 \text{ m} * 1.0 \text{ m} = 1.3 \text{ m}^2$.

En la parte superior se puso una salida para un tubo de 12 in de diámetro para extraer el aire húmedo, este diámetro se calculó en función de la caída de presión producida por el tubo.

La compañía tiene un ventilador equivalente al tamaño 12.25 de CHICAGO BLOWER, modelo 36A SQA SW, velocidad variable, velocidad máxima de 4300 rpm, de la gráfica de la curva de trabajo del ventilador podemos ver que a una presión estática de 7 in de agua tenemos un flujo máximo de 2266 CFM, a una presión atmosférica de 574mmHg, temperatura 65°C, RPM 4280, Bhp=3.56, eficiencia 70.1%⁽¹²⁾. Como se muestra en la siguiente gráfica:

CURVA DE TRABAJO PARA VENTILADOR 36A SQA

Descripción:

Tipo del Ventilador: Ventilador centrífugo Airfoil

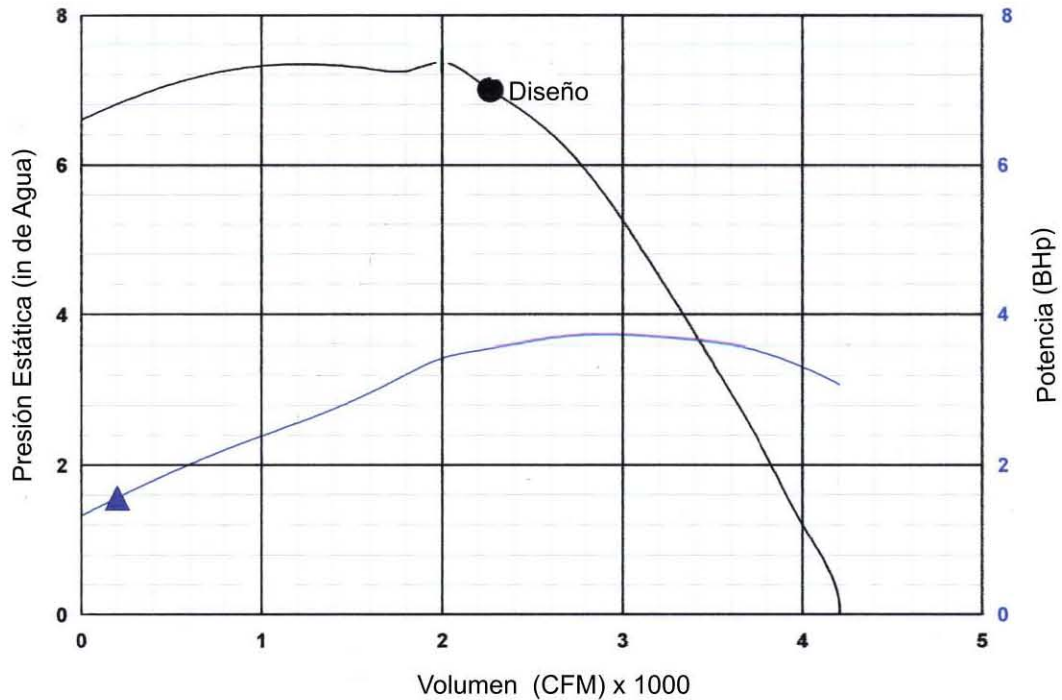
Modelo del Ventilador: 36A SQA SW

Tamaño del ventilador: 12 1/4

| | |
|---|-------|
| Volumen de Aire (CFM) | 2266 |
| Presión Estática (in de agua) | 7 |
| Densidad del Aire (lb/ft ³) | 0.046 |
| Temperatura (°F) | 149 |
| Altitud (ft) | 7939 |
| Velocidad (RPM) | 4279 |
| Potencia Requerida (Hp) | 3.56 |
| Eficiencia Estática (%) | 70.1 |
| Velocidad de salida del aire (ft/min) | 2575 |
| Máxima Velocidad a 149°F (RPM) | |
| RPM máxima (Clase I) | 4046 |
| RPM máxima (Clase II) | 4280 |

● -Diseño

▲ -Potencia vs volumen



Caída de presión en la tubería, para transportar el aire que sale del secador al filtro de lonas a diferentes diámetros:

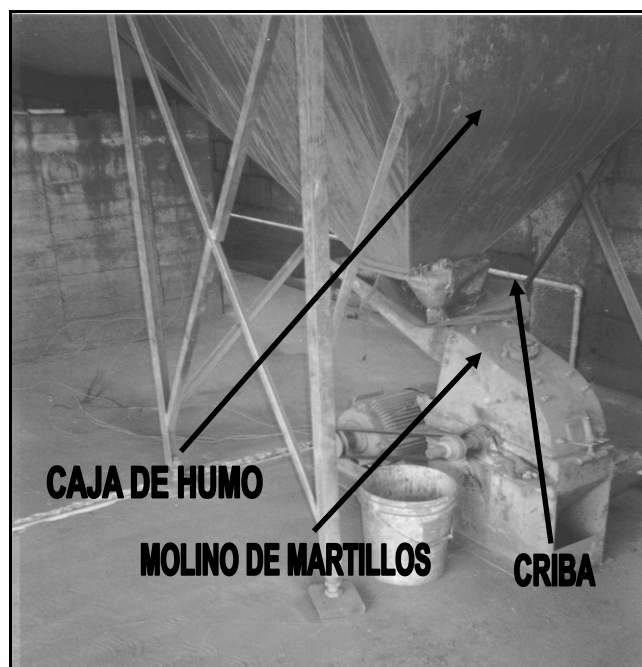
| | |
|-------------------|---|
| 10" diámetro tubo | 1.615 in H ₂ O de caída de presión |
| 12" diámetro tubo | 0.758 in H ₂ O de caída de presión |
| 14" diámetro tubo | 0.401 in H ₂ O de caída de presión |

Utilizamos tubería galvanizada 12" para acondicionamiento de aire, es diámetro comercial y para evitar asentamiento del material dentro de la tubería.

Colocamos un cono inferior a la caja de humo para que el polvo resbale, con una descarga de 20x20cm, saliendo por aquí el polvo seco, el cual pasa inmediatamente por una criba de hierro de 0.5" de agujero para separar impurezas del material.

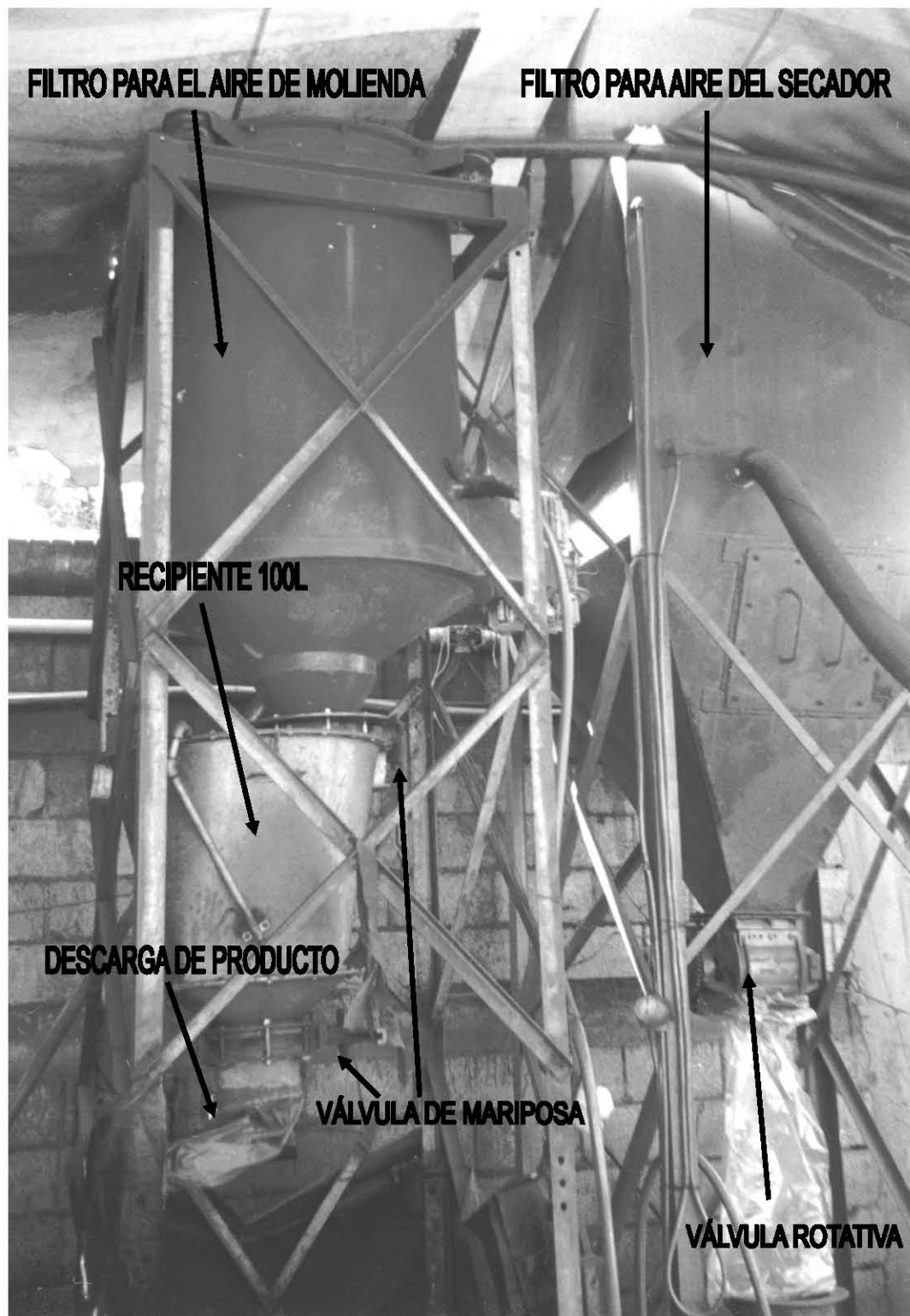
6.5. MOLIENDA Y TRANSPORTE

En la descarga de la caja de humo se colocó un molino de martillos con un motor de 5 Hp que trabaja a 3500 RPM, como se muestra a continuación:



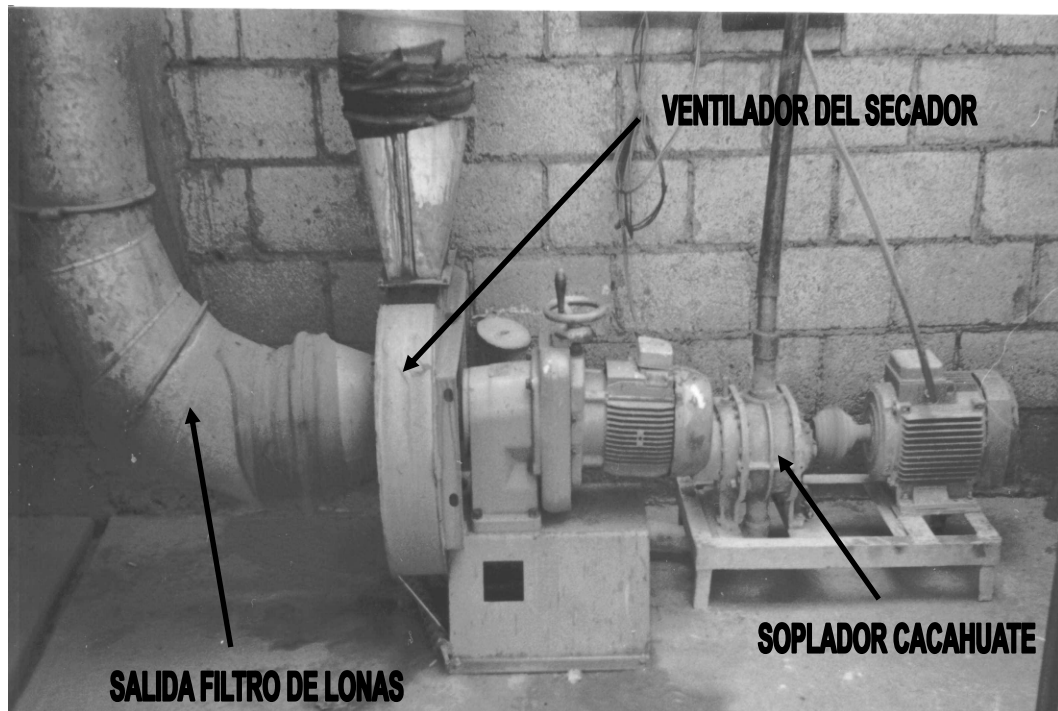
En la parte inferior del molino con un tubo de 2" se extrae el polvo fino que pasó por la malla del molino y después pasa al filtro de lonas del molino donde aquí se separa el producto del aire, el aire que entró por el molino sirvió para transportar el producto, el flujo de este aire se genera por medio de un soplador de cacahuate.

Por debajo del filtro del molino se colocaron dos válvulas de mariposa, entre estas válvulas hay un recipiente de 100 litros, para poder sacar el material cuando el sistema esté trabajando, mientras una válvula esta cerrada la otra está abierta. El sistema trabaja entre 6 y 10 in de agua, como se muestra a continuación:



6.6. FILTRO PARA EL SECADOR

El aire que se extrae del secador pasa a un filtro de lonas para separar el polvo arrastrado por el aire, este flujo de aire es generado por medio de un ventilador mostrado en la siguiente foto.



El fabricante de lonas recomienda la lona MS-201, polipropileno-multifilamento, ligamento SARGA, resistencia trama 255 Kg/5cm, espesor 1.05mm, 25x13 hilos, permeabilidad 254 ft³/min m², para una lona resistente a la tensión y polipropileno resistente a la humedad, por lo que para 2,266 CFM necesitamos un área de :

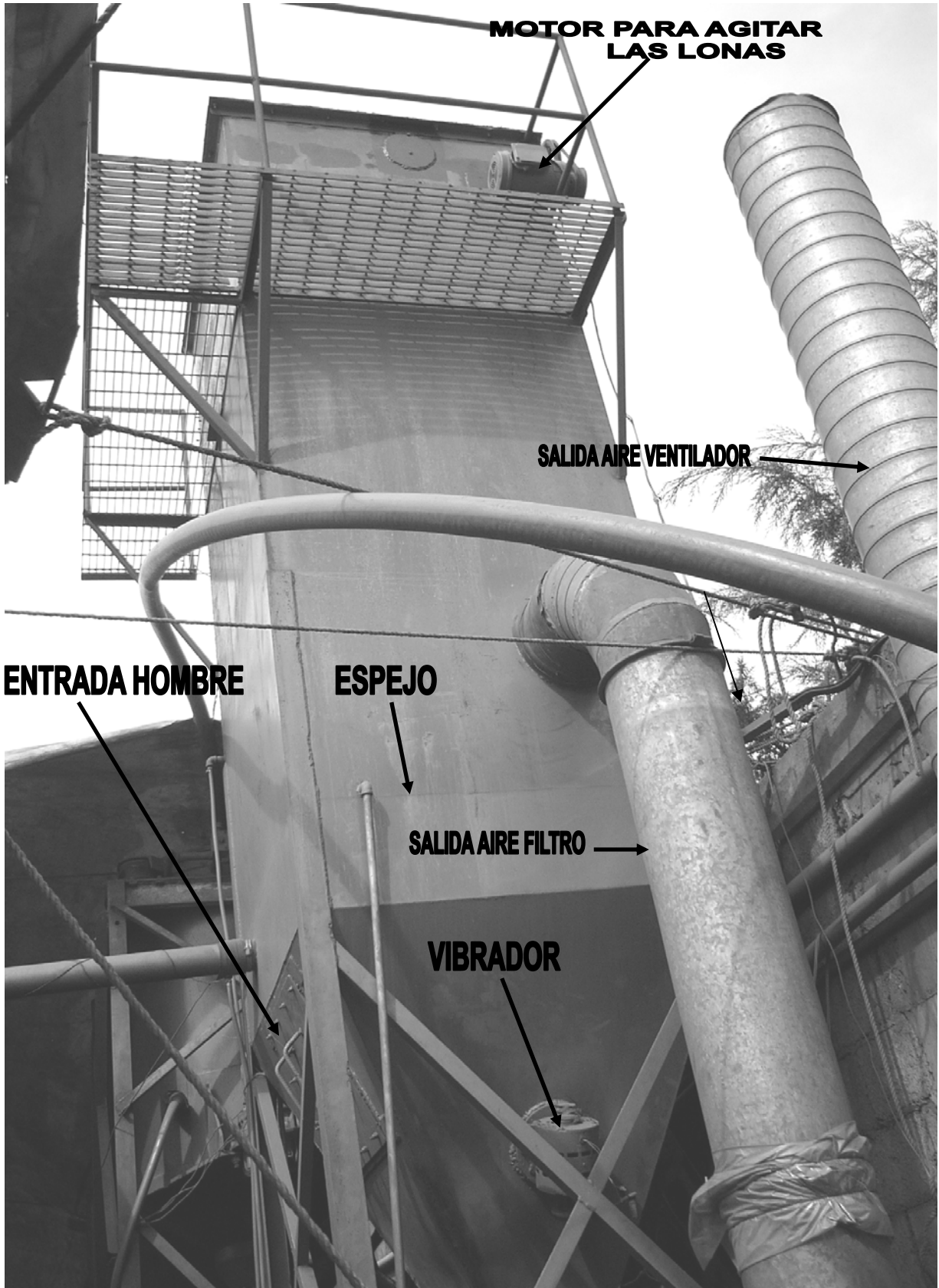
$$\text{Area} = (2,266 \text{ ft}^3/\text{min}) / (254 \text{ ft}^3/\text{min m}^2) = 5.75 \text{ m}^2 \text{ (13)}$$

El filtro de lonas que vemos en la siguiente foto, se hizo con 16 lonas de 22cm de diámetro y 2.4 m de largo obteniendo así una área total de

27m². El cuerpo del filtro se hizo cuadrado de 1.22m X 3.00m de alto, con lamina calibre 12 y un cono de 1.00m de alto en la parte inferior con una válvula rotativa para descargarlo, en la parte superior del filtro se fabricó un sistema de agitación de las lonas para poder despegar el polvo de ellas, con un número de 100 oscilaciones por minuto.⁽¹⁾

Arriba del cono se puede apreciar un cordón de soldadura, a esta altura se encuentra el espejo donde se amarran las 16 lonas de 22 cm de diámetro y 2.4 m de largo, en la parte superior se encuentra una canastilla movable hacia un sentido y donde se amarran las 16 lonas, esta canastilla oscila por medio de un motor de $\frac{3}{4}$ de Hp de 800rpm. Se acopla el motor a un extremo de una flecha de 1" que sale del filtro mediante una banda en B y poleas, en el otro extremo de la flecha que se encuentra en el interior del filtro, se encuentra el extremo desconcéntrico, donde se conecta a la canastilla movable por medio de una biela, la flecha es soportada con chumacera de pared y de piso, en sus extremos.

En la parte inferior del filtro se encuentra una válvula rotativa para poder sacar el polvo sin tener que apagar el sistema.



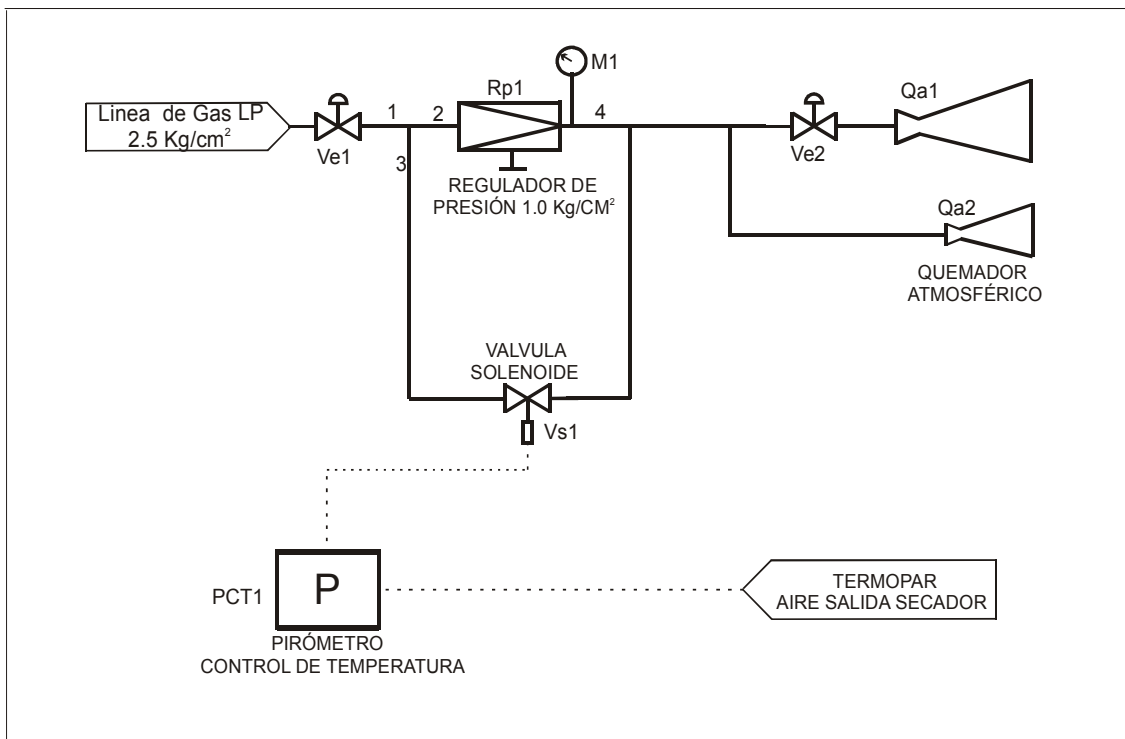
6.7. CONTROL DE TEMPERATURA

El control de temperatura de alta y baja presión es controlado con un pirómetro, como se muestra en el Diagrama No.1. La línea de Gas LP principal de $\frac{3}{4}$ " que viene de un tanque estacionario de 2300L, a una presión de 2.5 Kg/cm^2 , llega a una válvula de esfera (Ve1) que controla el paso del gas, pasando la válvula Ve1, la tubería se separa en dos, por el punto No.2 llega a un regulador de presión con manómetro, para bajar la presión de 2.5 Kg/cm^2 a 1.0 Kg/cm^2 , por aquí pasa el gas cuando los quemadores están funcionando en baja presión, por lo tanto queman menor cantidad de gas, por el punto No.3 pasa el gas con una presión de 2.5 Kg/cm^2 que se controla por una válvula solenoide (Vs1) hacia los quemadores, por aquí pasa el gas cuando los quemadores están funcionando en alta presión. La válvula solenoide (Vs1) es controlada por un pirómetro, la señal que controla al pirómetro viene de un termopar que se encuentra dentro del tubo del aire de salida del secador que va al filtro de lonas, el pirómetro se ajusta a la temperatura deseada, tiene por lo general 5°C de variación, por ejemplo si el pirómetro se ajusta a 65°C , entonces cuando la temperatura del aire de salida del secador baje a 62.5 el relay del pirómetro se cierra y hace que se abra la válvula solenoide y deje pasar el gas de 2.5 Kg/cm^2 , cuando la temperatura del aire de salida del secador llegue 67.5°C el relay del pirómetro se abre y la válvula solenoide se cierra.

Cabe mencionar que el operador debe de controlar la válvula Ve2, por ejemplo el operador se encuentra alimentando al secador a una

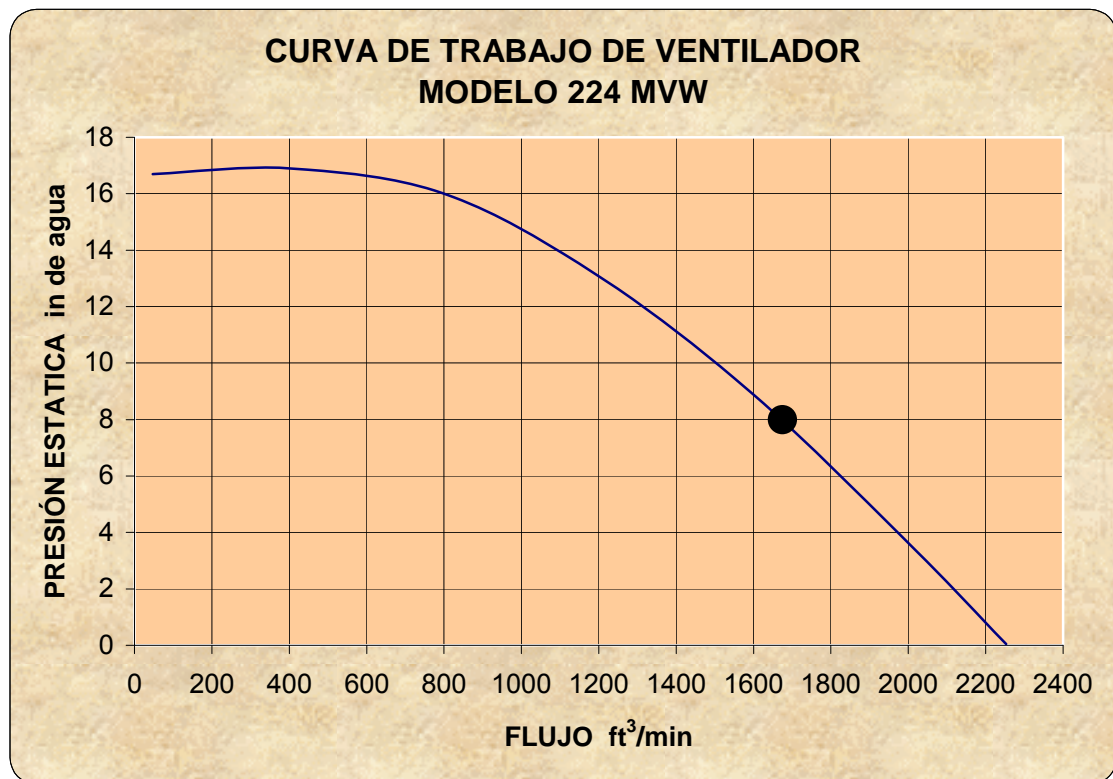
velocidad constante, si el pirómetro se queda en alta presión mucho tiempo, quiere decir que el secador necesita más calor, por lo tanto debe alimentar menos o abrir un poco la llave Ve2, por el contrario si los quemadores se quedan mucho tiempo a baja presión significa que necesita alimentar más material al secador o cerrar un poco la llave Ve2, una vez estabilizado es fácil su control.

DIAGRAMA No.1
CONTROL DE TEMPERATURA DEL SECADOR



7. PRUEBA DE SECADO

El ventilador modelo 36A SQA SW del secador se cambio ya que la caída de presión en el sistema era mayor de 7 in de H₂O. Se colocó un ventilador de alta presión marca TWIN CITY FAN AND BLOWER modelo MBW tamaño 224. La curva de trabajo para este ventilador se representa en la siguiente gráfica:



CFM=1720, RPM=3106, BHP=7.52, densidad=0.047lb/ft³,
altitud=7936 ft, temperatura=65°C.

El material alimentado al secador con humedad inicial de 27.7% base húmeda, fue alimentado constantemente, sin mezclarlo con material seco. En la tabla No. 9 se muestran los datos obtenidos.

TABLA No.9

RESULTADOS DE PRUEBA DE SECADO

| TIEMPO | TEMP SÓLIDO ENTRADA °C | TEMP SÓLIDO SALIDA °C | TBS AMBIENTE °C | TBH AMBIENTE °C | TBS SALIDA AIRE SECADOR °C | TBH SALIDA AIRE SECADOR °C | TBS SALIDA AIRE VENTILADOR °C | TBH SALIDA AIRE VENTILADOR °C | HUMEDAD MATERIAL SECO SALIDA % | PRESIÓN DEL FILTRO LONAS in H2O | FLUJO DE AIRE SALIDA SECADOR ft ³ /min |
|--------------|------------------------|-----------------------|-----------------|-----------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|---|
| 06:30 | 18 | 57 | 19 | 15 | 65 | 46 | 50 | 44 | 1.32 | 3.5 | 1891 |
| 06:40 | 18 | 58 | 19 | 15 | 65 | 47 | 50 | 45 | 1.49 | 3.8 | 1866 |
| 06:50 | 18 | 59 | 19 | 15 | 65 | 48 | 51 | 45 | 1.23 | 4.3 | 1825 |
| 07:00 | 18 | 58 | 19 | 15 | 65 | 48 | 50 | 45 | 1.56 | 5 | 1784 |
| 07:10 | 18 | 58 | 19 | 15 | 65 | 48 | 50 | 46 | 1.09 | 6 | 1702 |
| 07:20 | 18 | 59 | 19 | 15 | 65 | 49 | 50 | 47 | 1.41 | 7.3 | 1616 |
| 07:30 | 18 | 60 | 19 | 15 | 65 | 50 | 49 | 48 | 1.78 | 9 | 1509 |

PRODUCCIÓN 338Kg/Hr MÁS EL MATERIAL QUE SALE DEL FILTRO DE LONAS 398.2 **Kg** **totales**

MATERIAL TOTAL CON LA HUMEDAD DE 1.09% = 398.2 **Kg**

LECTURA DE GAS = 27 **LITROS** tiempo de trabajo 1 hora

HUMEDAD INICIAL DEL MATERIAL A SECAR= 27.70% **BASE HÚMEDA**

CANTIDAD DE MATERIAL SECO AGREGADO= 0 **Kg**

MATERIAL QUE SALE DEL FILTRO DE LONAS= 62.5 **Kg** HUMEDAD= 4.73% **BASE HÚMEDA**

Observamos que después de una hora la humedad del producto aumenta ya que la temperatura de bulbo húmedo y bulbo seco se acercan, debido a que disminuye el flujo de aire.

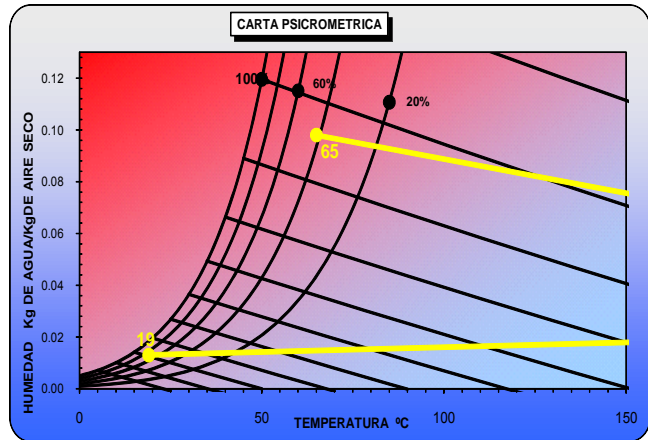
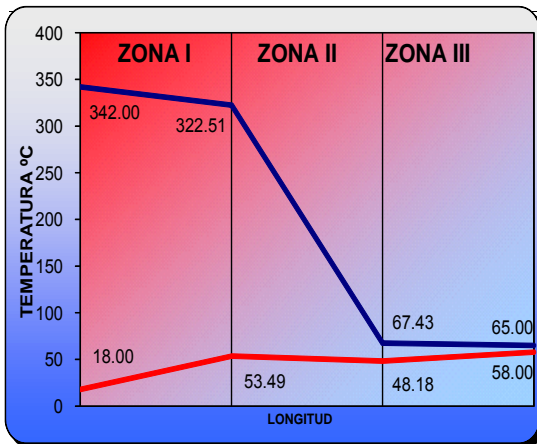
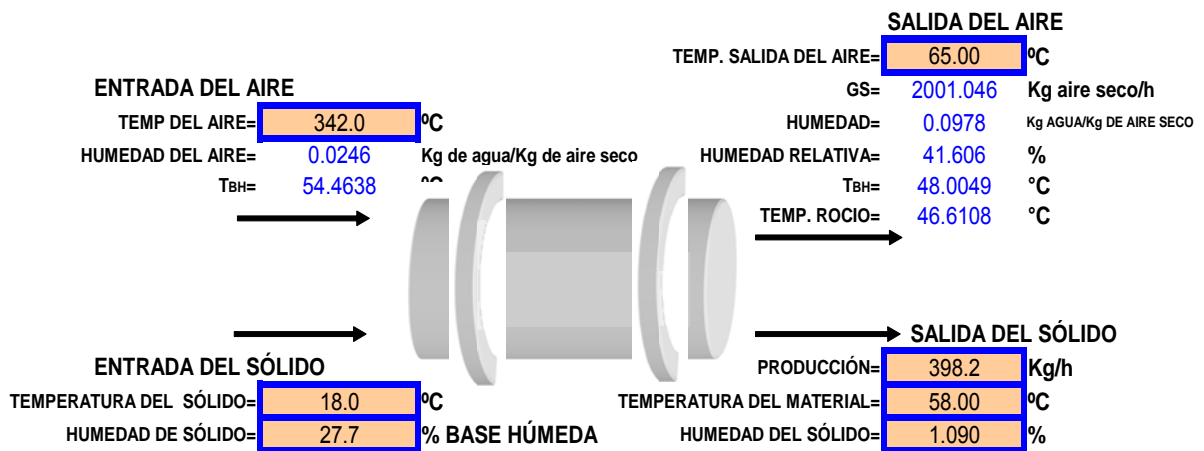
La producción de material seco que se obtuvo del secador fue de 338Kg, la cantidad de material recuperado en el filtro de lonas fue de 62.5 Kg, con una humedad de 4.73% base húmeda. Por lo tanto la producción total de material con una humedad de 1.09% base húmeda fue de 398.2Kg. La cantidad de gas utilizado durante 1 h fue de 27 L.

Los datos que obtuvimos se realizaron en 1 hora, el flujo de aire durante este tiempo fue cambiando, de la tabla No.9 de los resultados de la prueba, observamos que para el tiempo de 7:10 el flujo del aire es aproximadamente el promedio entre el flujo inicial y final, entonces éstos fueron los datos que usamos para el programa.

Para obtener en el programa datos que se acercan a los experimentales es necesario aumentar el espesor del aislante, en este experimento el espesor fue de 0.0396 in. En diferentes pruebas de secado el espesor varía de 0.0351 a 0.0405 in. El consumo de gas LP lo fijamos a 27 L, la temperatura de bulbo húmedo de la salida del secador a 48°C, entonces movemos el espesor del aislante con el fin de que coincida el gas LP y la temperatura de bulbo húmedo de la salida del secador, de esta forma obtenemos el calor perdido por el cuerpo del cilindro, más cercano al real y se obtiene del programa los resultados de la prueba de secado:

DATOS NECESARIOS PARA LA PRUEBA DE SECADO

| | | |
|--|---------|-------------|
| TEMPERATURA AMBIENTE T_{amb} = | 19.0 | °C |
| TEMP. BULBO HÚMEDO DEL AMBIENTE $T_{BH\ amb}$ = | 15.0 | °C |
| PRESIÓN ATMOSFERICA (PT) = | 574.0 | mmHg |
| DIFERENCIA DE TEMPERATURA ENTRE EL GAS SALIDA Y PRODUCTO= | 7.00 | °C |
| ESPESOR DE AISLANTE (LANA MINERAL) DEL SECADOR E_{ais} = | 0.0396 | in |
| DIÁMETRO DEL SECADOR D_s = | 1.040 | M |
| PESOS/ KW DE LUZ= | 2.123 | PESOS/KW |
| PESOS / LITRO DE GAS= | 4.060 | PESOS/LITRO |
| SUELDO POR PERSONA= | 150.000 | PESOS/DÍA |



LONGITUD EN m EN CADA ZONA

| | FRACCIÓN PÉRDIDA DE CALOR | LONGITUD m | % N_{TOG} |
|----------|---------------------------|------------|-------------|
| ZONA I | 0.0476928 | 0.3714403 | 2.639 |
| ZONA II | 0.9390437 | 7.3134393 | 92.492 |
| ZONA III | 0.0132635 | 0.1032982 | 4.869 |

LONGITUD TOTAL = 7.788 m

RESULTADOS DEL PROGRAMA DE LA PRUEBA DE SECADO

| | | | | | |
|--|------------|-------------------------|----------------------------------|-----------------|--------------|
| HUMEDAD DEL AMBIENTE= | 0.0125 | Kg AGUA/Kg DE AIRE SECO | | | |
| Nt _{og} TOTAL = | 1.872 | | longitud para el cálculo= | 9.500 | |
| LONGITUD DEL CUERPO CALCULADO= | 7.788 | m | LONGITUD propuesta p/fabricación | 8.567 | m |
| EVAPORACIÓN= | 146.540 | Kg AGUA/h | | | |
| VELOCIDAD DEL AIRE DENTRO DEL SECADOR= | 534.946 | lb/hr ft ² | 0.726 | Longitud fija = | 9.5 m |
| COSTO DEL GAS LP PARA SECAR= | 0.27497 | PESOS/Kg | | | |
| LITROS DE GAS LP CONSUMIDOS= | 26.969 | L/h | | | |
| VOLUMEN DEL VENTILADOR= | 2932.097 | m ³ /h | velocidad aire = | 0.959 | m/s del aire |
| VOLUMEN DEL VENTILADOR (FCM)= | 1725.767 | ft ³ /min | | 3.452 | Km/h |
| CALOR SUMINISTRADO POR EL QUEMADOR= | 181510.684 | KCAL/h | | | |
| CALOR PERDIDO POR EL CUERPO= | 52605.921 | KCAL/h | | | |
| EFICIENCIA TÉRMICA= | 71.018 | % | | | |
| rpm MÍNIMA= | 4.664 | | | | |
| rpm MÁXIMA= | 9.329 | | | | |

TUBERÍA DE SALIDA DE AIRE DEL SECADOR AL FILTRO

| | | | | |
|---|-----------|--|------------------------------|--------------------|
| DIÁMETRO TUBERÍA DE AIRE SALIDA (D) = | 12.0 | in | | |
| VISCOSIDAD DEL AIRE SALIDA (μ) = | 0.0196 | CENIPOSE | APÉNDICE E | |
| DENSIDAD DEL AIRE SALIDA (ρ) = | 0.757382 | Kg/m ³ | 0.04724 | lb/ft ³ |
| VELOCIDAD DEL AIRE SALIDA (v) = | 11.162 | m/s | | |
| NRE= | 1.315E+05 | | NRE= D v ρ / μ (11) | |
| No. CODOS 90° = | 1.0 | | | |
| COEFICIENTE DE RESISTENCIA (K) = | 2.328 | (11)pag A-49 | | |
| FACTOR DE FRICCIÓN (f) = | 0.0250 | OBTENER DATO | (11)pag A-42 - A-43 | |
| LONGITUD DE TUBERÍA= | 4.0 | m | | |
| ΔP = | 0.6253 | K W ² / (D ⁴ ρ) | (11)pag 3-6 | |
| ΔP = | 0.001 | bar | 0.441 | IN DE AGUA |

8. CONCLUSIONES

Con los datos obtenidos podemos ver claramente que se cumplieron los objetivos, secar un material de óxido de hierro con humedad inicial del 30%, obtener un producto de óxido de hierro molido con una humedad menor del 2% y una producción mayor de 200Kg/h, este objetivo lo rebasamos con una producción de 345Kg/h en promedio.

Antes se utilizaba la energía solar para el secado, la cual es gratis, pero se tenía que transportar el material húmedo a una distancia de 600Km, haciendo un cálculo de gasolina, casetas, viáticos, mano de obra, desgaste del camión, energía eléctrica, se obtuvo un costo aproximado en ambos casos de \$1.00/Kg, en el secador rotatorio se obtuvo un producto con mayor calidad, ya que contiene una humedad más controlada y menor impureza.

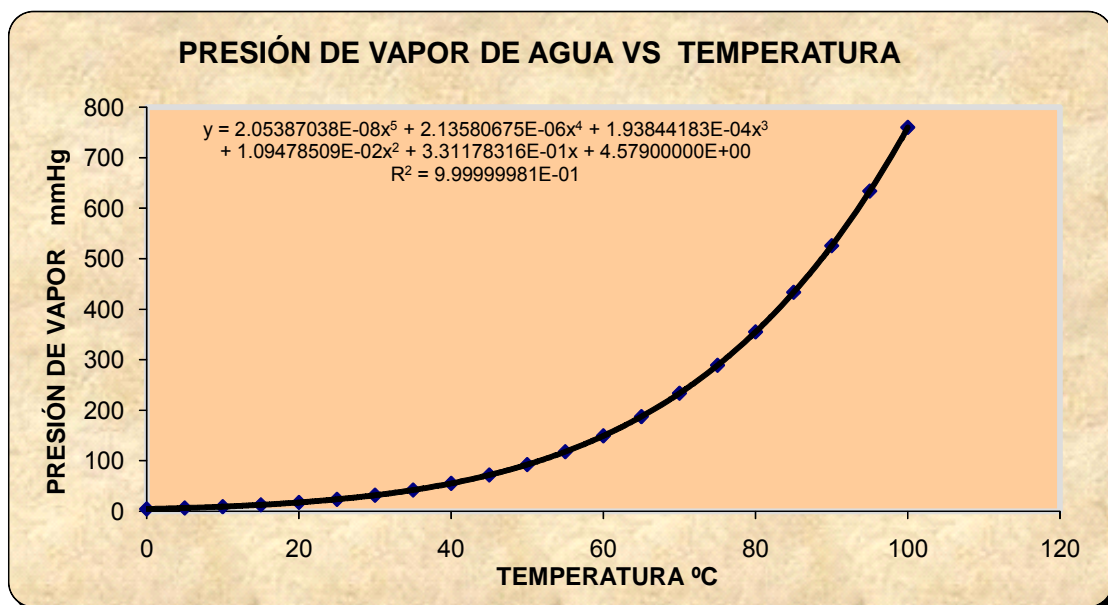
Uno de los problemas que se observaron en la fabricación del secador, es el ventilador y el filtro de lonas, el ventilador debe ser adecuado para manejar el aire necesario, que está en función de la altitud, temperatura del gas y caída de presión en el sistema (tuberías y filtro de lonas), además para que el secador tenga un mejor control, el filtro debe limpiarse durante el secado, para que resulte un proceso continuo, y el producto obtenga una humedad constante.

9. APÉNDICE A

DATOS

| TEMP °C | PRESION DE VAPOR mm de Hg |
|------------|---------------------------------|
| 0 | 4.5790 |
| 5 | 6.5430 |
| 10 | 9.2090 |
| 15 | 12.7880 |
| 20 | 17.5350 |
| 25 | 23.7560 |
| 30 | 31.8240 |
| 35 | 42.1750 |
| 40 | 55.3240 |
| 45 | 71.8800 |
| 50 | 92.5100 |
| 55 | 118.0400 |
| 60 | 149.3800 |
| 65 | 187.5400 |
| 70 | 233.7000 |
| 75 | 289.1000 |
| 80 | 355.1000 |
| 85 | 433.6000 |
| 90 | 525.7600 |
| 95 | 633.9000 |
| 100 | 760.0000 |

(1) PAG.2-49 TABLA 2-5



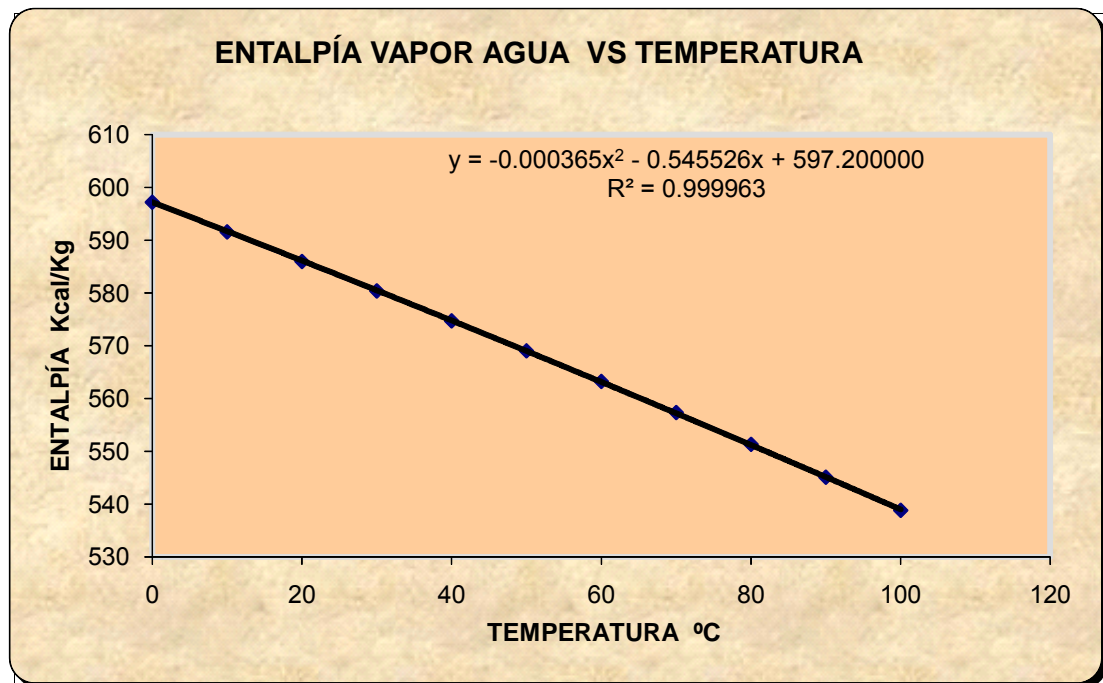
TEMPERATURA = 100.0 °C

10. APÉNDICE B

DATOS

| LANDA | |
|-------------------|---|
| TEMPERATURA °C | ENTALPÍA VAPOR DE AGUA Kcal/Kg |
| 0 | 597.2 |
| 10 | 591.56 |
| 20 | 585.97 |
| 30 | 580.4 |
| 40 | 574.72 |
| 50 | 569.05 |
| 60 | 563.26 |
| 70 | 557.37 |
| 80 | 551.35 |
| 90 | 545.12 |
| 100 | 538.86 |

(3) Pag. 93



y=ENTALPÍA DE VAPOR AGUA Kcal/Kg

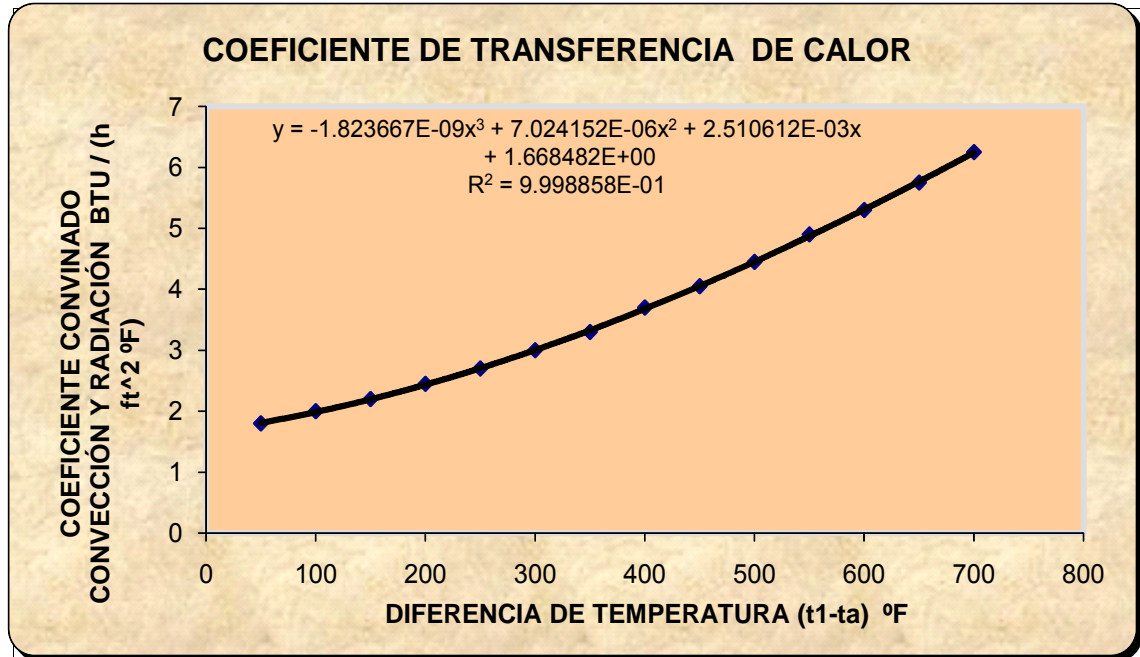
TEMPERATURA = 54.6 °C

ENTALPÍA: 566.3144 Kcal/Kg

11. APÉNDICE C

| temperatura °F | ha BTU/(h ft ² °F) |
|-------------------|----------------------------------|
| 50 | 1.8 |
| 100 | 2 |
| 150 | 2.2 |
| 200 | 2.45 |
| 250 | 2.7 |
| 300 | 3 |
| 350 | 3.3 |
| 400 | 3.7 |
| 450 | 4.05 |
| 500 | 4.45 |
| 550 | 4.9 |
| 600 | 5.3 |
| 650 | 5.75 |
| 700 | 6.25 |

(5) pag 34



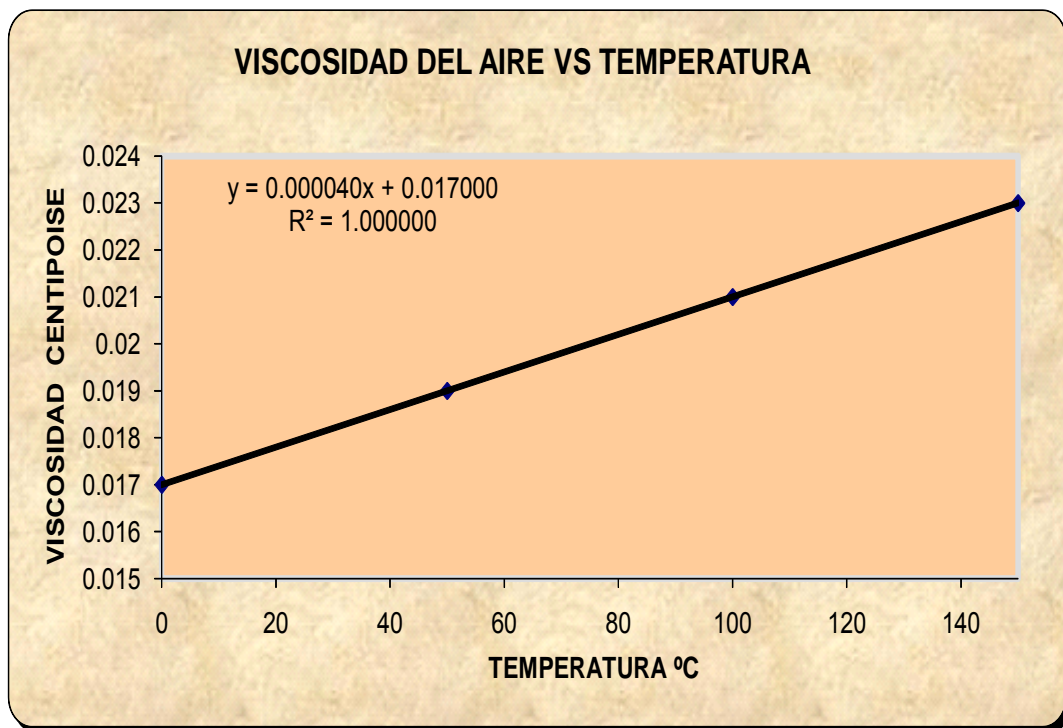
DIFERENCIA TEMPERATURA (t1 ta)= 250.0 ° F

ha = 2.7066497 BTU/(h ft² °F)

12. APÉNDICE D

| TEMPERATURA °C | VISCOSIDAD DEL AIRE CP |
|-------------------|------------------------------|
| 0 | 0.017 |
| 50 | 0.019 |
| 100 | 0.021 |
| 150 | 0.023 |

(5)pag929-930

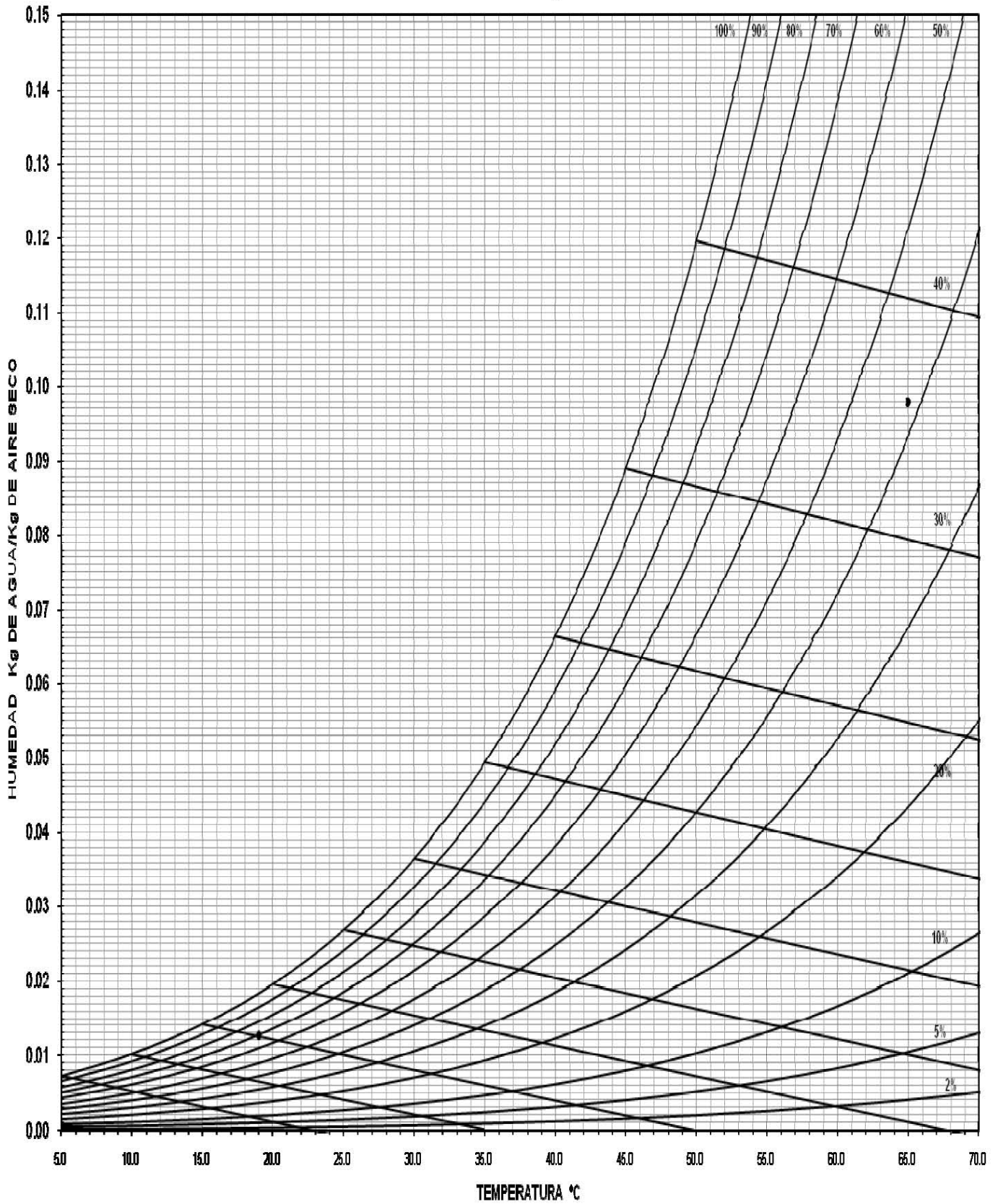


TEMPERATURA= 50.0 °C

VISCOSIDAD = 0.019 CENTIPOISE

13. APÉNDICE E

CARTA PSICROMÉTRICA PRESIÓN = 574 mmHg JILOTEPEC, ESTADO DE MÉXICO



14. BIBLIOGRAFÍA

- 1.- Perry j.,
“MANUAL DEL INGENIERO QUÍMICO”,
Traducción al español 3 era. Edición
Editorial UTEHA
México (1982)

- 2.-Robert E. Traybal
“OPERACIONES DE TRANSFERENCIA DE MASA”
Segunda edición
McGRAW-HILL
México (1987)

- 3.-Antonio Valiente, Rudi Primo Stivalet
“PROBLEMAS DE BALANCES DE ENERGÍA”
Primera edición
Editorial Alambra
México (1982)

- 4.- Antonio Valiente, Rudi Primo Stivalet
“PROBLEMAS DE BALANCES DE MATERIA”
Primera edición
Editorial Alambra
México (1981)

- 5.-Donald Q. Kern
“PROCESOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR”
Decimocuarta impresión
Editorial Continental
México (1980)

- 6.-Pytel, Andrew y Singer, Ferdinand L.
“RESISTENCIA DE MATERIALES”
Editorial Alfaomega
México (1981)
- 7.-Vasant K. Patel
“FRICTION LOSS IN PIPING”
Hydrocarbon Processing
Vol. 63/No.1/100-102
January (1984)
- 8.- Nash, W. A.
“RESISTENCIA DE MATERIALES”
Editorial McGraw-Hill
México (1970)
- 9.-Selmec
“MANUAL DE DATOS TÉCNICOS”
Décima Quinta Edición
México (1992)
- 10.-G. Nonhebel
“EL SECADO DE SÓLIDOS EN LA INDUSTRIA QUÍMICA”
Editorial Reverté
España (1979)
- 11.-Crane
“FLUJO DE FLUIDOS EN VÁLVULAS, ACCESORIOS Y
TUBERÍAS”
Editorial McGRAW-HILL
Edición en Español

12.- Software Selección del ventilador

Chicago Blower

<http://www.chiblo.com/service/software.asp>

13.-Fichas técnicas (FILTRACIÓN)

Industrial Comercial Técnica SA.

<http://www.ict-filtracion.com/principal.php?i=es>

15.- Software Selección del ventilador

TWIN CITY FAN AND BLOWER

<http://www.tcf.com/TCFBlower/index.asp>