

Determinación experimental de Correlaciones empíricas para la transferencia de calor y caída de presión en lechos empacados de frutos secos deshidratados

Presley Wilson Barros Vire

**Determinación experimental de Correlaciones empíricas
para la transferencia de calor y caída de presión en
lechos empacados de frutos secos deshidratados**

Presley Wilson Barros Vire

Este libro ha sido debidamente examinado y valorado en la modalidad doble par ciego con fin de garantizar la calidad científica del mismo.

© Publicaciones Editorial Grupo Compás
Guayaquil - Ecuador
compasacademico@icloud.com
<https://repositorio.grupocompas.com>



Barros, P. (2023) Determinación experimental de Correlaciones empíricas para la transferencia de calor y caída de presión en lechos empacados de frutos secos deshidratados. Editorial Grupo Compás

© **Presley Wilson Barros Vire**

ISBN: 978-9942-33-717-7

El copyright estimula la creatividad, defiende la diversidad en el ámbito de las ideas y el conocimiento, promueve la libre expresión y favorece una cultura viva. Quedan rigurosamente prohibidas, bajo las sanciones en las leyes, la producción o almacenamiento total o parcial de la presente publicación, incluyendo el diseño de la portada, así como la transmisión de la misma por cualquiera de sus medios, tanto si es electrónico, como químico, mecánico, óptico, de grabación o bien de fotocopia, sin la autorización de los titulares del copyright.

Prólogo

Este libro sirve de apoyo empírico para la determinación de correlaciones empíricas para la caída de presión y transferencia de calor en lechos empacados con productos agrícolas como el maní, maíz y soya de tal forma de lograr niveles de rendimiento y eficiencia en los diseños de equipos de enfriamiento o calentamiento para estos productos.

El libro se estructura en un orden que inicialmente se revisarán los fundamentos teóricos de los lechos empacados y basándose en esta teoría se diseñará el equipo experimental para realizar las respectivas pruebas, que inicialmente se deberá calibrar y seleccionar adecuadamente los parámetros dentro de los cuales se efectúan las pruebas para no exceder los márgenes de error por cuestiones de precisión de los instrumentos o parámetros ambientales que no pueden ser controlados. Dentro de estos parámetros se determinarán las correlaciones empíricas y los márgenes de error. Los resultados y muestras obtenidas serán analizados para llegar a conclusiones que determinarán el rendimiento y facilidad de uso de las correlaciones empíricas en los equipos de enfriamiento o calentamiento del maní, soya y maíz. En el campo de acción no involucrará la transferencia de masa, porque los productos se encuentran en humedad crítica o sea que están en equilibrio con la humedad del aire e incluso los tiempos de operación y toma de datos son cortos para que suceda una transferencia de masa apreciable. En todo caso se realiza una reducción de errores en la sección de análisis de resultados de acuerdo a las condiciones en las que se utiliza el equipo.

ÍNDICE GENERAL

Prólogo	3
Generalidades de lechos empacados	10
Clasificación de los lechos empacados, por su conformación estructural	11
Propiedades de las partículas	12
Longitud característica de las partículas	13
Métodos indirectos alternativos para determinar la longitud características de las partículas del lecho empacado	13
El tamaño del diámetro de las partículas.....	14
Propiedades térmicas de las partículas.....	14
La altura de los lechos empacados rellenos	15
Generalidades de productos deshidratados	16
Métodos tradicionales de secado.....	16
Descripción química de las partículas de los productos deshidratados.....	19
Determinación de las propiedades térmicas de los productos deshidratados.....	23
Determinación del coeficiente de fracción de vacío	26
Generalidades del equipo experimental	28
Consideraciones para el diseño del equipo experimental	29
Cámara de enfriamiento	29
Dimensiones del lecho empacado	30
Criterios relevantes para el diseño de lechos empacados.....	33
Determinación experimental de la longitud característica	33
Cálculo de la fracción de vacío	33
Análisis termodinámico del lecho empacado.....	34
Análisis de la transferencia de calor en el lecho empacado	38
Análisis de la relevancia de la transferencia de masa en tiempos cortos.....	44
Determinación de la caída de presión en el sistema.....	45
Caída de presión en columnas empacadas	47
Análisis de la velocidad mínima de fluidización	64
Selección del ventilador.	69
Diseño del banco de resistencias eléctricas.....	69
Instrumentos de medición.	70
Diseño de accesorios y componentes varios.	71

Limitaciones del diseño.....	71
Diseño pruebas experimentales.....	73
Medición para flujo de aire en ductos.....	73
Determinación del area de la seccion cruzada	74
Medicion de velocidad de flujo de aire	74
Promedio de las medidas tomadas.	75
Medición de la caída de presión en lecho empacado	75
PROCEDIMIENTO PARA TOMAR MEDIDAS DE PRESION.....	77
Medición de temperaturas.....	78

ABREVIATURAS.

A_p	Área transversal del lecho empacado.
A_s	Área transferencia de calor.
Bi	Número de Biot.
C_p	Capacidad calorífica de la partícula.
cfm:	pies cúbicos sobre minutos
cm ² :	Centímetro cuadrado
D_p :	Longitud característica
d:	diámetro de partícula.
$\frac{dU}{dt}$:	Cambio instantáneo de energía interna en el tiempo
G:	Fuerza de la gravedad.
ϵ :	Fracción de vacío
Re	Número de Reynolds
ft/min:	Pie sobre minuto
g/cm ³ :	Gramos sobre centímetro cúbico
g:	Gramos
k	Conductividad térmica
Kg/m ³ :	kilogramo sobre metro cúbico
h:	Convección dentro del lecho.
h_1 .	Entropía a la entrada del sistema
h_2 .	Entropía a la salida del sistema
in H ₂ O:	pulgadas de Columna de Agua
Kg/s:	Kilogramo sobre segundo
Kj/KgK:	Kilo Joules sobre Kilogramo grado Kelvin
L	Altura del lecho
Ln (Re)	Logaritmo natural del número de Reynolds
Ln (Nu)	Logaritmo natural del número de Nusselt

$\log \sigma_g :$	Logaritmo de la desviación estándar
m:	metro unidad
$\dot{m} :$	Flujo masico
mm:	milímetro unidad
$m_p:$	masa de partícula
m/s:	Metros sobre segundo
Nu	Número de Nusselt.
plg H ₂ O:	pulgadas de Columna de Agua
Pr	Número de Prandalt
$\Delta P : \Delta P :$	Caída de presión a través del lecho empacado
Pa	Pascales
plg H ₂ O:	pulgadas de Columna de Agua
$\rho:$	Densidad
t	tiempo
T	Temperatura.
$\Delta T :$	Diferencial de Temperatura
$\Delta T_{ml} :$	Diferencial de Temperatura media logarítmica
Sp	Superficie del grano
U	Energía interna
V _c :	Volumen de un cuerpo
v:	Velocidad del aire en vacío
W:	Trabajo energía

SIMBOLOGIA.

A_p	Área transversal del lecho empacado.
A_s	Área transferencia de calor.
Bi	Número de Biot.
C_p	Capacidad calorífica de la partícula.
cfm:	pies cúbicos sobre minutos
cm ² :	Centímetro cuadrado
D_p :	Longitud característica
d:	diámetro de partícula.
$\frac{dU}{dt}$:	Cambio instantáneo de energía interna en el tiempo
G:	Fuerza de la gravedad.
ϵ :	Fracción de vacío
Re	Número de Reynolds
ft/min:	Pie sobre minuto
g/cm ³ :	Gramos sobre centímetro cúbico
g:	Gramos
k	Conductividad térmica
Kg/m ³ :	kilogramo sobre metro cúbico
h:	Convección dentro del lecho.
h_1 .	Entropía a la entrada del sistema
h_2 .	Entropía a la salida del sistema
in H ₂ O:	pulgadas de Columna de Agua
Kg/s:	Kilogramo sobre segundo
Kj/KgK:	Kilo Joules sobre Kilogramo grado Kelvin
L	Altura del lecho
m:	metro unidad

\dot{m} :	Flujo masico
mm:	milímetro unidad
m_p :	masa de partícula
m/s:	Metros sobre segundo
Nu	Número de Nusselt.
plg H ₂ O:	pulgadas de Columna de Agua
Pr	Número de Prandalt
ΔP : ΔP :	Caída de presión a través del lecho empacado
Pa	Pascales
plg H ₂ O:	pulgadas de Columna de Agua
ρ :	Densidad
t	tiempo
T	Temperatura
ΔT :	Diferencial de Temperatura
ΔT_{ml} :	Diferencial de Temperatura media logarítmica
U	Energía interna
V_c :	Volumen de un cuerpo
v:	Velocidad del aire en vacío
W:	Trabajo energía

Generalidades de lechos empacados

El modelo para determinar la magnitud de la transferencia de calor global en lechos empacados sujetos a gases fluyendo, es aquel que incorpora la conducción axial, la transmisión de calor entre la cama y el gas fluyente, y el efecto de transmisión en la conducción.

En el modelo que se ha utilizado, se realiza un análisis teórico preliminar, para estimar la conducción de calor y un análisis estadístico de las pruebas de experimentales para la convección en la transferencia de calor. Los resultados numéricos obtenidos, usando el modelo propuesto se comparan, con los datos experimentales.

El lecho empacado es un sistema termodinámico compacto, atravesado por un flujo de gas. Este sistema termodinámico se conforma de partículas sólidas, con propiedades físicas y químicas similares.

La velocidad del flujo de gas que atraviesa el lecho define el tipo de lecho. Si la velocidad del aire es menor a la velocidad de arrastre o sustentación, se lo denomina lecho empacado, porque sus partículas se mantienen en reposo. Si la velocidad del aire es mayor que la velocidad de arrastre, las partículas salen del reposo y el lecho se denomina lecho fluidizado.

El flujo de gas, a través del lecho empacado es relevante en los procesos industriales, que realizan transferencia y almacenamiento de energía térmica. Estos sistemas, empiezan con una temperatura inicial, posteriormente, en el proceso de transferencia de calor entre el lecho y el gas dará como resultado la variación de la temperatura en el lecho.

Los lechos empacados son sistemas térmicos que tienen varias aplicaciones: Industriales, agrícolas, filtración, etc.

Clasificación de los lechos empacados, por su conformación estructural

Los lechos empacados se clasifican de acuerdo con las características físicas en:

- Lechos empacados rellenos
- Lechos empacados porosos

Lecho empacado relleno.

Este tipo de lecho se conforma de partículas sólidas, homogéneas, por ejemplo: pilas de rocas, filtros de arena, cigarrillos, columnas de absorción. Las columnas de absorción se rellenan normalmente con objetos cerámicos, de plástico o metálicos de formas especiales; tales como: anillos que tienen una gran área superficial y una elevada fracción de huecos; por tanto, presentan una baja resistencia al flujo.

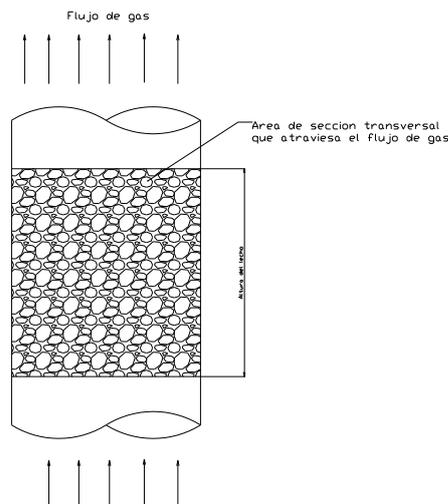


Figura 1.1. Lecho empacado relleno

Lecho empacado poroso

Este tipo de lecho se conforma con materiales porosos, similares a las estructuras preparadas; tales como: partículas de alúmina sinterizadas, esponjas de espuma de poliuretano, colchones .de espuma de caucho, etc.

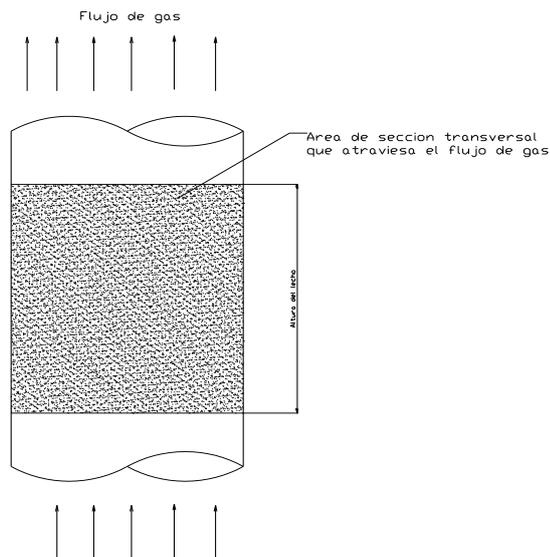


Figura 1.2. Lecho empacado poroso

Propiedades físicas de los lechos empacados rellenos

Para el análisis térmico de los lechos empacados rellenos, denominados simplemente como lechos empacados, es necesario conocer las siguientes propiedades, de las partículas y del flujo (aire) que lo atraviesa

Propiedades de las partículas

Propiedades físicas:

- Longitud característica de la partícula.
- Fracción de vacío.
- Altura del lecho
- Propiedades térmicas

- Propiedades térmicas de las partículas del lecho empacado.
- Propiedades térmicas del fluido del lecho empacado.

Longitud característica de las partículas

El tamaño de las partículas esféricas se mide con facilidad utilizando un calibrador, regla o con cualquier instrumento de medición. El valor que se obtiene será el diámetro o radio. La medida se observa directamente.

Las partículas de formas irregulares o no esféricas tienen muchos valores desiguales, en consecuencia, se define una longitud característica con las muestras de las partículas y con las reglas estadísticas. Representa a la partícula en una sola dimensión. Esta longitud facilita el análisis de las partículas irregulares, mejorando el análisis del lecho empacado.

Métodos indirectos alternativos para determinar la longitud característica de las partículas del lecho empacado

El método consiste en pesar una cantidad conocida de partículas; luego se obtiene el volumen total al granel de esta cantidad de partículas en consecuencia se obtiene el diámetro promedio por deducción geométrica.

La técnica de desplazamiento del fluido para encontrar el volumen de masa de una cantidad de partículas se describe a continuación:

En un recipiente lleno con líquido no volátil se vierten las partículas y el volumen del líquido desalojado, representa el volumen de las partículas en el recipiente, excepto en el caso de que las partículas sean porosas o tengan gran poder de absorción.

El tamaño del diámetro de las partículas

La importancia de esta propiedad radica en su efecto sobre la caída de presión y la fracción de vacío. En la medición del tamaño de las partículas se utilizará el procedimiento y los instrumentos adecuados, Las partículas se clasifican con relación a su tamaño:

- Partículas grandes de diámetro mayores a 1mm
- Partículas Intermedias de diámetro que oscilan entre 40 μ m y 1mm
- Partículas pequeñas de diámetro menores a 40 μ m.

Partículas grandes. - Son mayores a 1mm el tamaño del diámetro, la longitud característica se determinará directamente usando: reglas, calibradores, micrómetros etc.

Partículas de tamaños intermedios. - Son partículas en las que no se puede utilizar un calibrador, o instrumento de medición directa; en este caso se utilizarán mallas, éstas existen en diferentes medidas, de acuerdo con una estandarización de cada fabricante de tamices.

Partículas de tamaños pequeños. - Son partículas menores a 40 μ m; se utilizarán métodos indirectos, como sedimentación o de estudio del movimiento browniano para medir el tamaño de la partícula.

Propiedades térmicas de las partículas

Las partículas que conforman el lecho deben ser homogéneas en sus propiedades térmicas y de transferencia de calor; como son: la temperatura, el calor específico, conductividad térmica, difusividad térmica y la densidad.

Propiedades térmicas del fluido

Las propiedades relevantes en este análisis de lechos empacados son: la conductividad térmica, número de Prandalt, viscosidad cinemática, viscosidad dinámica, calor específico, densidad y la temperatura.

Todas las propiedades térmicas del fluido que se expresan en función de la temperatura media del fluido en uso.

La fracción de vacío en los lechos empacados rellenos

Este es un valor muy importante en el cálculo del lecho empacado, se caracteriza principalmente por la estructura geométrica del grano y se la conoce como “ ε ”.

El valor de la fracción de vacío se calcula por la cantidad de espacio sin llenar el lecho empacado.

La altura de los lechos empacados rellenos

Los lechos rellenos, normalmente, se conforman dentro de envases de área transversal constante. Se debe identificar la altura del lecho, en el diseño de fabricación de los sistemas mecánicos.

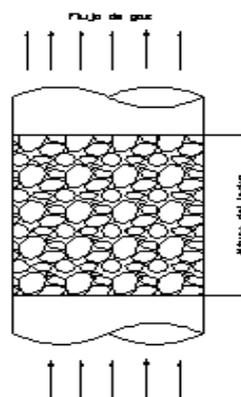


Figura 1.3. lechos porosos

Generalidades de productos deshidratados

Descripción general de los productos deshidratados

Características generales de los productos deshidratados

Entre los productos deshidratados en análisis se encuentran los cereales secos como, por ejemplo: trigo, maíz, centeno, etc.

En los cereales existen tres grupos principales, que se detallan a continuación:

- Grupo de verano, son como el maíz, etc. requieren escardas y riego; deben plantarse espaciados.
- Grupo de invierno, pertenecen el trigo, la avena, la cebada etc. Se siembran muy espesos y alcanzan un desarrollo muy reducido.
- Grupo especial de cultivo, como el arroz y otros cereales que comprenden, modos de cultivos muy particulares: trasplantes, corriente de agua, etc.

Métodos para obtener productos deshidratados en Ecuador

Deshidratación es el método de conservación de los alimentos que consiste en reducir a menos del 13% su contenido interno de agua.

Se conoce dos formas de secar el grano:

- Métodos tradicionales
- Métodos artificiales

El método tradicional, está muy cerca a la desecación natural, frutos secados al sol, por ejemplo.

Métodos tradicionales de secado

En las zonas soleadas y de clima templado es frecuente ver productos alimenticios extendidos en los patios traseros, sobre esteras, piedras o colgando de los aleros de las viviendas. En los países más fríos también

resultan apropiadas las técnicas tradicionales de secado cuando las condiciones climáticas son adecuadas.

Estos simples métodos de secado tienen algunas ventajas:

- Prácticamente no requieren de ningún costo adicional, ya que no utilizan combustible.
- No necesitan estructuras permanentes, lo que permite que después de la estación de secado, el terreno quede disponible para la agricultura o para otros fines.

Pero también tienen muchas limitaciones:

- La pérdida de humedad puede no ser constante, ya que depende del clima.
- El secado es muy lento y a menudo el producto no llega a secarse completamente en un solo día, por lo que debe permanecer expuesto durante toda la noche para finalizar su secado al día siguiente. Esto aumenta el riesgo de deterioro, en especial debido al desarrollo de hongos.
- Los niveles finales de humedad que se alcanzan no son lo suficientemente bajos, lo que aumenta las posibilidades de deterioro del producto durante el almacenado. En otras ocasiones, el producto alcanza niveles de secado superiores a los límites recomendables.
- El producto está expuesto a la contaminación por el polvo y la suciedad y a la infestación por insectos.
- Al permanecer a la intemperie puede ser dañado o hurtado por las aves u otros animales.
- En el caso de cultivos a granel, como los cereales, se necesita mucho terreno para colocar el grano.

- Se requiere de mano de obra adicional para extender el grano, voltearlo y recogerlo cuando hay riesgo de lluvia.
- Los granos pueden adquirir un color oscuro y el nivel de ciertos nutrientes, particularmente las vitaminas, puede disminuir por la exposición directa al sol (este riesgo es mayor en algunos productos que en otros).

El simple secado al sol se aplica a una amplia gama de productos tales como el pescado, la carne, los cereales, las menestras, las frutas, los vegetales y las raíces comestibles.

El método artificial, se basa en la exposición del producto a una corriente de aire caliente. Se llama liofilización o crío desecación, a la deshidratación al vacío de los alimentos. Los microorganismos no pueden desarrollarse en un medio sin agua. Además, en estas condiciones, tampoco es posible la actividad enzimática, y la mayor parte de las reacciones químicas, se hacen mucho más lentas de lo normal. Por eso, la deshidratación es el mejor método de conservación para productos que deben ser almacenados por largos períodos. Para lograr una protección óptima, hay que eliminar casi en su mayor parte toda el agua. A continuación, los alimentos se colocan en un envase perfectamente estanco, para que no absorban humedad del aire. Por ello, estos alimentos deben mantenerse en cajas herméticamente cerradas que, además, están aisladas del oxígeno, la luz, los insectos y los roedores.

La deshidratación y sobre todo la liofilización presentan además la ventaja de conservar, gran parte de las cualidades nutritivas del producto original.

Las legumbres, los cereales, las frutas, la carne, el pescado y algunos otros alimentos, cuya humedad esta por el rango del 80%, deben desecarse hasta reducir el peso inicial a una quinta parte y el volumen a la mitad, aproximadamente. Los principales inconvenientes de esta técnica son: el

tiempo y la mano de obra, necesarios para rehidratar los alimentos. Además, la reconstitución del producto seco puede resultar difícil, pues sólo absorberá las dos terceras partes del contenido de agua original, lo que le confiere una textura dura y correosa.

Descripción química de las partículas de los productos deshidratados

Las principales sustancias que constituyen el grano son los carbohidratos, lípidos, cenizas, fibras, agua y proteínas. Cuando en un grano predomina el almidón; se llama al grano amiláceo. Cuando la sustancia que predomina, es un lípido, se lo llama oleaginoso y se denomina proteico, cuando imperan las proteínas.

A continuación, se presentan tablas con la composición química de algunos productos deshidratados; en este cuadro se puede ver las marcadas diferencias que la composición química de cada grano tiene sobre las propiedades térmicas.

Tabla 1. Composición química de los productos deshidratados

	%						PROPIEDADES TERMICAS			
	Agua	Proteínas	Lípidos	Carbohidratos	Fibras	Cenizas	Densidad Kg/m ³	Cp J/Kg°C	Conductividad Térmica W/m°C	Difusividad Térmica m ² /s
MANI	7	15,6	9,6	62	3,4	2,4	1336,72	1963,59	0,2515	9,14080
SOYA	10,54	34,1	17,7	33,5	4,9	4,7	1250	2104,57	0,246612	8,719212
MAIZ	12	8,4	1,2	77,3	0,5	0,6	1466,56	1956,26	0,3309851	1,1044987

Determinación de las propiedades térmicas de los productos deshidratados

Para obtener las propiedades térmicas de los productos deshidratados, en este caso de los cereales deshidratados, se ha recurrido a las correlaciones obtenidas por Choi y Okos.

Choi y Okos (1987) efectuaron estudios de los efectos de la variación de la composición sobre las propiedades térmicas, basándose en los siguientes componentes: humedad, proteínas, lípidos, carbohidratos, fibras y cenizas. Estas correlaciones están función únicamente de la temperatura a que está expuesto el alimento.

Las correlaciones permiten calcular: la densidad del alimento, su calor específico, la conductividad y difusividad térmicas.

Las correlaciones usadas para encontrar el calor específico en (J/kg°C), de los distintos componentes son los siguientes:

$$C_p \text{ alimento} = \sum C_{pi} \cdot X_i \quad \text{Ecuación 1.1}$$

Donde T es la temperatura del alimento en °C

Siendo el C_p del alimento:

Donde X_i = Fracción de componente del alimento

$$C_p \text{ proteínas} = 2008,2 + 1208,9 \cdot 10^{-3}T - 1312,9 \cdot 10^{-6}T^2 \quad \text{Ecuación 1.2}$$

$$C_p \text{ lípidos} = 1984,2 + 1473,3 \cdot 10^{-3}T - 4800,8 \cdot 10^{-6}T^2 \quad \text{Ecuación 1.3}$$

$$C_p \text{ carbohidratos} = 1548,8 + 1962,5 \cdot 10^{-3}T - 5939,9 \cdot 10^{-6}T^2 \quad \text{Ecuación 1.4}$$

$$C_p \text{ fibra} = 1845,9 + 1930,6 \cdot 10^{-3}T - 4650,9 \cdot 10^{-6}T^2 \quad \text{Ecuación 1.5}$$

$$C_p \text{ cenizas} = 1092,6 + 1889,6 \cdot 10^{-3}T - 3681,7 \cdot 10^{-6}T^2 \quad \text{Ecuación 1.6}$$

Para el agua sobre la congelación:

$$C_p \text{ agua} = 4176,2 - 9,0862 \cdot 10^{-5}T + 5473,1 \cdot 10^{-6}T^2 \quad \text{Ecuación 1.7}$$

La conductividad térmica del alimento se calcula como:

$$K_{\text{alimento}} = \sum k_i \cdot X_{vi} \quad \text{Ecuación 1.8}$$

Donde X_{vi} es la fracción en volumen de cada componente del alimento y se determina de la fracción de masa X_i , de la densidad individual (ρ_i) y de la densidad del alimento (ρ_{alimento}):

$$X_{vi} = (X_i \cdot \rho_{\text{alimento}} / \rho_i) \quad \text{Ecuación 1.9}$$

En la conductividad térmica evaluada en (W/m°C), de los distintos componentes son las siguientes:

$$k_{\text{agua}} = 0,57109 + 0,0017625T - 6,7376 \cdot 10^{-6}T^2 \quad \text{Ecuación 1.10}$$

$$K_{\text{proteínas}} = 0,1788 + 0,0011958T - 2,7178 \cdot 10^{-6}T^2 \quad \text{Ecuación 1.11}$$

$$k_{\text{lípidos}} = 0,1807 - 0,0027604T - 1,7749 \cdot 10^{-7}T^2 \quad \text{Ecuación 1.12}$$

$$k_{\text{carbohidratos}} = 0,2014 + 0,0013874T - 4,3312 \cdot 10^{-6}T^2 \quad \text{Ecuación 1.13}$$

$$k_{\text{fibra}} = 0,18331 + 0,0012497T - 3,1683 \cdot 10^{-6}T^2 \quad \text{Ecuación 1.14}$$

$$k_{\text{cenizas}} = 0,3296 + 0,001401T - 2,9069 \cdot 10^{-6}T^2 \quad \text{Ecuación 1.15}$$

Las densidades individuales en (kg/m³) son obtenidas de las ecuaciones siguientes:

$$\rho_{\text{agua}} = 997,18 + 0,0031439T - 0,0037574T^2 \quad \text{Ecuación 1.16}$$

$$\rho_{\text{proteínas}} = 1329,9 - 0,51814T \quad \text{Ecuación 1.17}$$

$$\rho_{\text{lípidos}} = 925,59 - 0,41757T \quad \text{Ecuación 1.18}$$

$$\rho_{\text{Carbohidratos}} = 1599,1 - 0,31046T \quad \text{Ecuación 1.19}$$

$$\rho_{\text{fibra}} = 1311,5 - 0,36589T \quad \text{Ecuación 1.20}$$

$$\rho_{\text{cenizas}} = 2423,8 - 0,28063T \quad \text{Ecuación 1.21}$$

La difusividad térmica de los alimentos se calcula a partir de la densidad, calor específico y conductividad térmica a través de la fórmula siguiente:

$$\alpha_{a \text{ alimento}} = \frac{K_{a \text{ alimento}}}{Cp_{a \text{ alimento}} \cdot \rho_{a \text{ alimento}}} \quad \text{Ecuación 1.22}$$

Se debe tomar en cuenta que las correlaciones empleadas, solo consideran las fracciones de los componentes en los alimentos, sin considerar su interacción, lo que podría variar los resultados en cierta medida.

Las propiedades térmicas principales de los productos deshidratados

Se definen como:

Calor específico (C_p). - Es la medida de la cantidad de energía, que cambia inherente a la unidad de temperatura por unidad de masa. Sus unidades son (J/kg°C).

Conductividad térmica (k). - Es la medida, de flujo de calor de un área, cuando varia la temperatura en una unidad; y la distancia, en una unidad de longitud. Sus unidades son (W/m°C).

Difusividad térmica (α). - Es la relación entre la conductividad térmica y el calor específico, por su densidad. Sus unidades son (m²/s).

Determinación del coeficiente de fracción de vacío

La fracción de vacío es importante en el cálculo del lecho empacado, se caracteriza, por la estructura geométrica del grano y se la conoce como “ ε ” para dar claridad al concepto se presenta la ecuación siguiente.

$$\varepsilon = \frac{\text{Volumen}_{\text{vacío en el lecho empacado}}}{\text{Volumen}_{\text{total(vacío + masa partículas)}}$$

Ecuación 1.23

$$\varepsilon = \frac{V_{\text{vacío}}}{V_{\text{total}}} = \frac{V_{\text{vacío}}}{V_{\text{vacío}} + V_{\text{masapartículas}}} \quad \text{Ecuación 1.24}$$

$$V_{particula} = V_{total} (1 - \varepsilon) \quad \text{Ecuación 1.25}$$

El valor fracción de vacío se lo calcula, por la cantidad de espacio sin llenar del lecho empacado. Para esto se llena una probeta de volumen conocido con partículas homogéneas.

Inicialmente, se pesa la probeta vacía y luego cuando esta se llena de partículas, se pesa nuevamente para obtener la masa de ese volumen de partículas, con esto se obtiene lo que se conoce como, Densidad al granel, que se define:

$$Densidad_{granel} = \frac{Volumen_total(V_{vacio} + V_{particula})}{Peso_total}$$

Ecuación 1.26

La densidad al granel, incluye el volumen vacío y el volumen de las partículas.

El caso en que las partículas no absorben líquidos o se los ha recubierto con algún tipo de impermeable. Se llena una probeta de volumen conocido con las partículas hasta que estas ocupen todo el volumen de la probeta y después se llena con agua.

El agua ocupa solo los espacios vacíos que han quedado entre las partículas, lo siguiente que se hizo es recoger y medir el volumen del líquido, que es el volumen del espacio vacío de la probeta.

El valor de fracción de vacío, experimentalmente se expresa por la siguiente ecuación:

$$\varepsilon = \frac{\text{Volumen de espacio vacío}}{\text{Volumen de la probeta}} \quad \text{Ecuación 1.27}$$

Generalidades del equipo experimental

El equipo para obtener las correlaciones de transferencia de calor promedio, a través de un lecho empacado de productos deshidratados.

Los coeficientes de transferencia de calor se obtienen a través del análisis de tiempo, combinando los resultados experimentales de un banco de ensayo, con las soluciones numéricas del modelo matemático resultante.

Los modelos matemáticos se generan por un método estadístico, basado en la toma de datos, recogidos directamente del lecho empacado. Usando un esquema híbrido, para los términos convectivos y un esquema totalmente implícito, para la caída de presión.

Las pruebas experimentales y las simulaciones numéricas se realizaron para diferentes valores de velocidad superficial del fluido, a la entrada del lecho y para diferentes valores de porosidad del medio; obteniéndose que los números de Nusselt, dependen en gran escala de:

Los números de Reynolds, propiedades de los productos agrícolas, incluyendo la porosidad o fracción de vacío, dentro del lecho concordando satisfactoriamente, con los resultados de investigaciones similares.

Consideraciones para el diseño del equipo experimental

La gráfica muestra un esquema del diseño del equipo

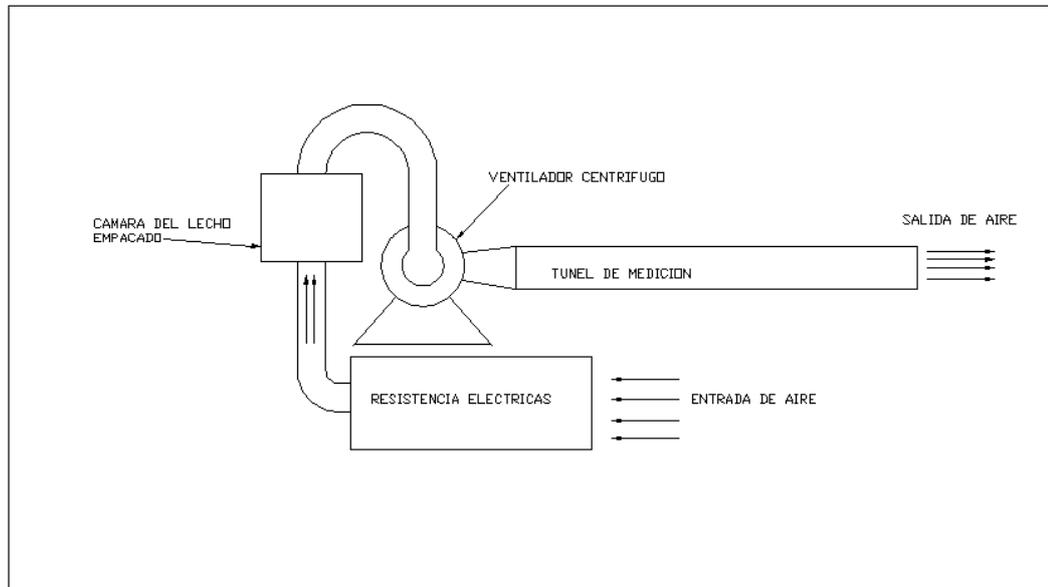


Figura 2.1. Esquema del equipo

Cámara de enfriamiento

La cámara de enfriamiento es el componente físico que se utilizará para contener al cúmulo de partículas que conformaran el lecho empacado.

Esta cámara debe ser adiabática en sus paredes laterales para evitar pérdidas de calor considerables.

Debe tener en el fondo una malla con las perforaciones adecuadas, normalmente deben ser del 75% de la longitud característica de la partícula. En su parte superior estará abierto de tal forma que exista una libre circulación de flujo de aire para este caso de análisis.

Dimensiones del lecho empacado

Las dimensiones del lecho empacado se adaptan de acuerdo a la cámara de enfriamiento, por lo tanto, el área de la sección transversal, para el caso de una sola cámara, será constante y la altura del lecho podemos variarla aumentando la cantidad de producto dentro de la misma y el limitante es la altura de la cámara.

En el caso específico de este libro se decide utilizar dimensiones prácticas y manejables con un volumen que facilite el llenado y luego el vaciado de la cámara con el producto en estudio.

Las dimensiones de la cámara son:

Largo = 160 mm.

Ancho= 160 mm.

Alto = 200 mm.

Cantidad de producto que conforma el lecho empacado

La cantidad del producto deberá estar de acuerdo al volumen que entra en la cámara. El volumen de producto que llena la cámara en cuestión es de:

$$V=0.16*0.16*0.2$$

$$V=0,00512 \text{ m}^3$$

La cantidad de masa que llena la cámara es directamente proporcional a la densidad al granel.

Consideraciones para el diseño del equipo experimental

El equipo consta de un contenedor en forma de cubo, abierto sus extremos, y con sus paredes adiabáticas.

El equipo se ha montado verticalmente, para facilitar el análisis, de las partículas dentro del contenedor del lecho empacado.

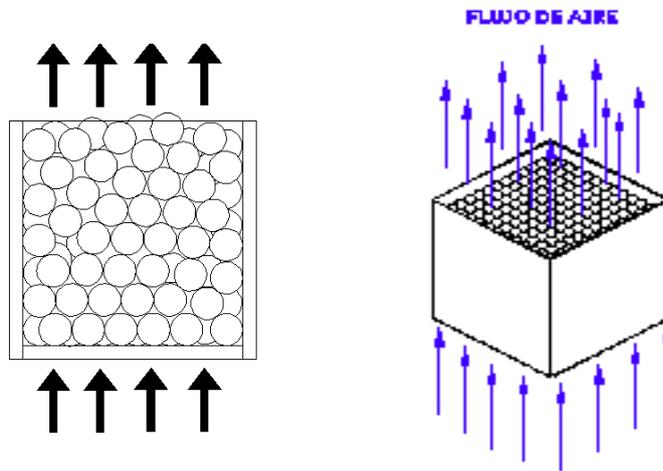


Figura 2.2. y 2.3. Esquema de la posición del lecho empacado

Los empaques evitan el incremento de la caída de presión, en el sistema y, en consecuencia, cambios en la dirección de la velocidad del fluido por el efecto de las fugas.

Las mallas deben tener suficientes perforaciones de tamaño regular para evitar la caída de presión y la caída de las partículas a través de la malla.

La presión óptima de operación dependerá de las características químicas y físicas del lecho empacado.

La temperatura máxima del lecho deberá ser 100°C , para evitar que el producto se queme, y convierta en un simple carbón, perdiendo su aroma y nutrientes alimenticios.

El flujo del aire, será unidireccional.

Se ha utilizado termocuplas, para monitorear los cambios de temperatura en el grano; estas se han introducido en la parte interna del producto, $r=0$ (Centro del grano)

El ventilador, absorbe el aire del lecho empacado, por lo tanto, estará haciendo un efecto negativo. (El aire subirá a través del lecho).

Los sistemas, se conectan por medio de bridas empernadas.

Entre las bridas, existen empaques de caucho.

El contenedor debe tener una perforación $\varnothing 3/8$ " en la entrada y la salida del lecho, en este se introduce el medidor de velocidad de flujo.

Las perforaciones se utilizan también para monitorear, las lecturas de caída de presión, en el lecho empacado.

Las partículas, con las que se ha experimentado son: maíz, soya y maní.

La porosidad del medio o la fracción de vacío, se encontró, experimentalmente para cada muestra de grano.

El banco de resistencias eléctricas, se utiliza para precalentar el aire, que se emplea para aumentar la temperatura interna del grano a 100°C en el lecho empacado.

El aislante que se ha utilizado para revestir las paredes de la cámara de enfriamiento, es lana de vidrio recubierto con papel aluminio de un espesor total de 1", este dato es el resultado del análisis de la transferencia de calor.

Criterios relevantes para el diseño de lechos empacados

- 1) Realizar análisis de transferencia de calor y termodinámica.
- 2) Elección del relleno
- 3) Área de la columna
- 4) Altura del lecho
- 5) Caída de presión

Determinación experimental de la longitud característica

Las variables que se presentan, cuando se quiere determinar la longitud de una partícula, son los siguientes:

- Todo tipo de formas de partículas, pueden tener la misma longitud característica.
- Tener el concepto claro de la forma irregular para identificar, en que definición está clasificado.
- Debe tomarse en cuenta, la rugosidad de la partícula, ya que esta afecta a la caída de presión.

La longitud característica que se obtuvo experimentalmente, con muestras de hasta 80 partículas para los siguientes productos son:

Maíz $L_c = 7,53\text{mm}$

Maní $L_c = 8,70\text{ mm}$

Soya $L_c = 5,84\text{ mm}$

Cálculo de la fracción de vacío

El método de calcular la fracción se lo indico en el capítulo 1 y de los resultados obtenidos se ha escogido el valor más crítico.

La fracción de vacío = $0,3 \pm 0,05$

Análisis termodinámico del lecho empacado

El objetivo de este análisis, es realizar el balance de masa y energía en el sistema termodinámico abierto y el otro cerrado; por lo tanto, se establece un volumen de control para aplicar los principios de la termodinámica.

Para el análisis térmico de lechos empacados, existen dos sistemas cada uno tiene su connotación térmica diferente como es el caso:

- El Primer sistema lo conforman únicamente las partículas de relleno. Este se considera cerrado, porque no hay una transferencia de masa relevante entre las partículas y el fluido. El volumen de control del lecho empacado (granos) se considera cerrado, ya que no existe transferencia de masa, pero realiza intercambio de calor con el segundo sistema.
- El Segundo sistema es abierto, este se compone del fluido que atraviesa el lecho, por lo tanto, se aplica un volumen de control porque hay un flujo de masa y un intercambio de calor con el primer sistema.

En este caso, la única interacción que tienen los dos volúmenes de control, uno abierto y el otro cerrado, es el calor cedido o ganado de un sistema al otro.

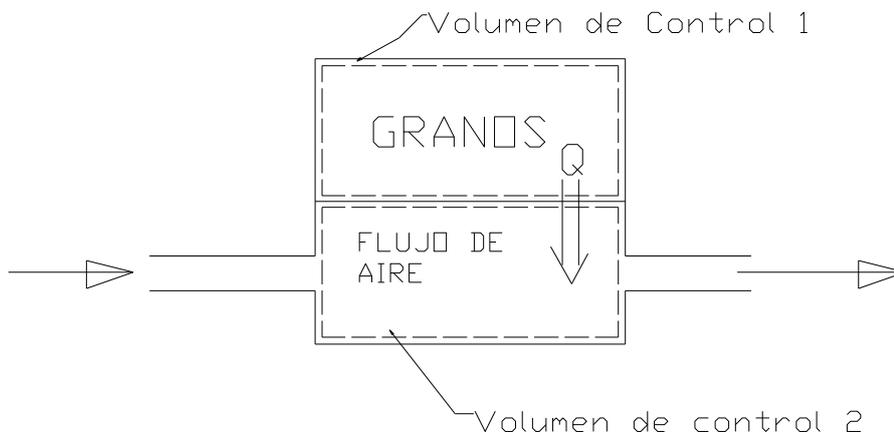


Figura 2.4 Sistema Térmico

El Volumen de Control para el Grano (sistema cerrado), no realiza trabajo por lo tanto $W = 0$ y la energía interna que se considera en los granos se aproxima a la ecuación:

$$\dot{Q} - \dot{W} = \frac{dU_{vc1}}{dt} \quad \text{Ecuación 2.7}$$

$$\dot{Q} = \frac{dU_{vc1}}{dt} \quad \text{Ecuación 2.8}$$

El volumen de control del aire (sistema abierto), no realiza trabajo, por lo tanto, $W = 0$ y la energía interna del aire es tan pequeña que se la considera despreciable.

$$\dot{Q} - \dot{W} + \dot{m}(h_1 - h_2) = \frac{dU_{vc2}}{dt} \quad \text{Ecuación 2.9}$$

m = flujo masico del aire.

h_1 = entropía de salida del sistema.

h_2 =entropía de entrada del sistema.

$$\dot{Q} = -\dot{m}(h_1 - h_2) \quad \text{Ecuación 2.10}$$

El calor añadido del volumen de control 1 es cedido al volumen de control 2 por lo tanto

$$\frac{dU_{vcl}}{dt} = \dot{m}(h_1 - h_2) \quad \text{Ecuación 2.11}$$

Para las partículas (granos) el calor emitido es:

$$Q = mC_p\Delta T \quad \text{Ecuación 2.12}$$

Tabla 2. Valores de operación en el análisis de transferencia de calor

Nombre	Q	m	Cp	ΔT
	Kj	Kg	Kj/KgK	C
Maíz	881,7664	5,45	2,05	79
Maní	1167,22105	5,45	2,71	79
Soya	881,33585	5,45	2,05	79

C_p =Capacidad calorífica de la partícula

ΔT = variación de la temperatura

m = masa total de la partícula

En este caso el sistema muestra, que no hay pérdidas de masa, por lo tanto:

$$m_S = m_E + \Delta m \quad \text{Ecuación 2.13}$$

$$m_S = m_E \quad (\text{no hay pérdida de masa de aire}) \quad \text{Ecuación .2.14}$$

Se utiliza el análisis de la transferencia de calor para encontrar el valor teórico del valor de Δt que es la variación del tiempo durante el cual ocurre el enfriamiento del lecho empacado, en las condiciones establecidas, con el método trasciende con resistencia interna despreciable, con este análisis se obtiene:

$$\dot{Q} = \frac{mC_p\Delta T}{\Delta t} \quad \text{Ecuación .2.15}$$

Esta ecuación se utiliza para el lecho empacado, o para las partículas que conforman el lecho empacado, para analizar la disminución de la temperatura por el proceso de enfriamiento por el flujo de aire, se determina que el calor cedido por el lecho empacado, es el valor ganado por el flujo de aire, por lo tanto, para saber que flujo de masa de aire necesito para este lecho empacado igualamos las ecuaciones:

$$\dot{Q}_{particula} = \dot{m}_{aire} C_{p_{aire}} \Delta T \quad \text{Ecuación .2.16}$$

Luego

$$\dot{m}_{aire} = \frac{\dot{Q}_{particula}}{C_{p_{aire}} \Delta T} \quad \text{Ecuación .2.17}$$

De esta forma se deduce el flujo masico de aire necesario para equilibrar esta transferencia de calor en el lecho empacado.

Análisis de la transferencia de calor en el lecho empacado

El lecho empacado tiene el flujo de gas ascendente, por lo tanto, se trabaja con el mínimo de velocidad de fluidización, para evitar la fluidización del lecho (las partículas no ascenderán).

En el lecho empacado existe un área grande de transferencia de calor en un volumen pequeño; existe un flujo de gas en el espacio vacío del lecho que aumenta la transferencia en la mezcla turbulenta.

El análisis de transferencia comienza con la “analogía de Reynolds”, que provienen de la analogía de la capa límite, con los coeficientes de dicha analogía. (Apéndice 1).

$$C_f = \frac{Re_L}{2} = Nu \quad \text{Ecuación 2.18}$$

Al reemplazar el número de Nusselt por el número de Stanton se obtiene:

$$St \equiv \frac{h}{\rho V c_p} = \frac{Nu}{Re Pr} \quad \text{Ecuación 2.19}$$

La ecuación 2.19 se expresa de la siguiente forma:

$$\frac{C_f}{2} = St \quad \text{Ecuación 2.20}$$

La ecuación 2.20 relaciona los parámetros de la capa límite de la velocidad térmica.

Existen muchas restricciones para el uso de estos resultados, como la aproximación de la capa límite, la cantidad de error de la ecuación

Ec. 2.20 depende de hacer Pr y $Sc \approx 1$ y la variación de la presión en las paredes y en el centro del lecho es la misma, perpendicular a la dirección del flujo $dp^* / dx^* \approx 0$. Esta demostración se aplica en una variedad de Prandtl, se incluyen ciertas correlaciones (Ecuación 2.21). En particular las analogías de Reynolds modificadas, o de Chilton-Colburn tiene la forma.

$$\frac{C_f}{2} = St Pr^{2/3} \equiv j_H \quad 0,6 < Pr < 60 \quad \text{Ecuación 2.21}$$

En donde J_H es el factor j de Colburn para la transferencia de calor, la ecuación 2.21, en flujo laminar es válido si $dp^* / dx^* \approx 0$ y en el caso de turbulento son válidas aproximadamente.

Existen diversas correlaciones para varios tamaños, formas y densidades al granel de las partículas. De estas correlaciones recomendadas por Frank P. Incropera y David P. De Witt para el flujo de gas en un lecho de esferas se obtiene la siguiente correlación.

$$\varepsilon J_H = 2.06 Re_D^{-0.575} \quad \text{Ecuación 2.22}$$

$$Pr = 0.7 \quad 90 \leq Re_D \leq 4000$$

El valor de prandtl, se trabaja con el valor de 0,7. La variación de prandtl es pequeña en el aire y oscila entre este valor.

El valor de j , del factor de Colburn definido por la ecuación 2.21 y con el número de Reynolds definido por:

$$Re_D = VD/\nu \quad \text{Ecuación 2.23}$$

El valor de Reynolds, permite un amplio margen de análisis. Este incluye régimen estacionario y régimen turbulento.

El parámetro importante, para el desarrollo de la transferencia de calor es la fracción de vacío y su valor se encuentra entre el 0,3 a 0,5.

Estas correlaciones se usan en materiales de compactado diferentes de esferas con un factor de corrección aplicado para cada caso.

En el caso de lechos compactos con partículas cilíndricas de forma uniforme en el que la razón longitud diámetro es 1, el factor de corrección será 0.79.

Para el uso de las correlaciones en un lecho empacado, con material cúbico el factor de corrección será: 0.71.

En el análisis de la transferencia de calor, se necesitan las temperaturas de trabajo, en consecuencia, se usa:

La temperatura media (T_s). - asume una temperatura de las partículas del lecho, esta es la media entre la temperatura inicial y final del lecho en el proceso.

La temperatura media logarítmica. - Relaciona la temperatura del fluido que entra (T_i) y sale (T_o), del lecho empacado con la temperatura media del grano (T_s) y se define por:

$$\Delta T_{ml} = \frac{(T_s - T_i) - (T_s - T_o)}{\ln\left(\frac{T_s - T_i}{T_s - T_o}\right)} \quad \text{Ecuación 2.24}$$

Entonces si el lecho se encuentra a una temperatura uniforme (T_s), la transferencia de calor será:

$$q = \bar{h} A_{p,t} \Delta T_{ml} \quad \text{Ecuación 2.25}$$

\bar{h} = Convección del aire en el lecho empacado ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)

$A_{p,t}$ = Área superficial total de las partículas (m^2)

ΔT_{ml} = Temperatura media logarítmica de la entrada y salida del aire. (K)

La temperatura a la salida del lecho empacado se calcula mediante:

$$\frac{T_s - T_o}{T_s - T_i} = \exp\left(-\frac{\bar{h} A_{p,t}}{\rho V A_{c,b} C_p}\right) \quad \text{Ecuación 2.26}$$

Esta ecuación se usa asumiendo resistencia interna despreciable en el grano y sus equivalencias son:

ρ = Densidad del fluido a la entrada del lecho ($\text{Kg.}/\text{m}^3$)

V = Velocidad del fluido a la entrada (m/s)

$A_{c,b}$ = Área de la sección transversal del lecho empacado. (m^2)

C_p = Capacidad calorífica del aire. ($\text{kJ}/\text{Kg}^\circ\text{K}$)

Con el valor de los diferentes Reynolds determinaremos los valores de Nusselt.

Realizando sustitución en las ecuaciones 19, 21 en la Ec. 22

Obtenemos

$$\varepsilon S_t P_r^{2/3} = 2,06 \text{Re}_D^{-0,575} \quad \text{Ecuación 2.27}$$

$$\varepsilon \left(\frac{Nu}{\text{Re}_D \text{Pr}} \right) P_r^{2/3} = 2,06 \text{Re}_D^{-0,575} \quad \text{Ecuación 2.28}$$

Despejando obtenemos:

$$\bar{N}_u = \frac{2.06 \cdot \text{Re}^{0.425} \cdot \text{Pr}^{1/3}}{\varepsilon} \quad \text{Ecuación 2.29}$$

Utilizando un Pr = 0.7 y el Reynolds de tablas, a continuación, se deduce el valor de la convección dentro del lecho empacado utilizando:

$$h = \frac{Nu \cdot K}{D} \quad \text{Ecuación 2.30}$$

Tabla 3. Resultados teóricos de la convección teórica con respecto a la velocidad del aire y la altura del lecho empacado de maíz

Velocidad aire	Altura Lecho	Conveccion Teorica
m/s	m	W/m2-K
2,134	0,15	
1,93	0,15	26,91
0,304	0,15	12,27
2,33	0,1	29,16
2,03	0,1	27,5
1,72	0,1	25,63
1,42	0,1	23,62
1,62	0,05	24,98
0,558	0,05	15,8
2,134	0,05	28,09
1,42	0,05	23,62

Con el valor de la convección se realiza el cálculo del valor de la transferencia de calor en la ecuación 2.36, con este valor realizamos la deducción del tiempo analizando con resistencia interna despreciable dentro de cada una de las partículas del lecho empacado.

Utilizando la solución aproximada para un biot, que se define como

$$Biot = \frac{hLc}{k} \quad \text{Ecuación 2.31}$$

Y con las deducciones que se muestran:

$$\theta_i = T_i - T_\infty \quad \text{Ecuación 2.32}$$

$$\frac{\rho V c}{h A_s} \ln \frac{\theta_i}{\theta} = t \quad \text{Ecuación 2.33}$$

Entonces se reduce a:

$$t = \frac{\rho V C_p}{h A_s} L n \frac{T_i - T_\infty}{T - T_\infty} \quad \text{Ecuación 2.34}$$

Con este tiempo teórico se puede saber en el análisis termodinámico cuanta transferencia de calor se está realizando en el proceso.

Tabla 4. Resultados teóricos de la convección, tiempo teórico con respecto a la velocidad del aire y la altura del lecho empacado de maní

Velocidad aire	Altura Lecho	Conveccion Teorica	tiempo teorico
m/s	m	W/m ² -K	s
2,134	0,15		
1,93	0,15	26,91	742
0,304	0,15	12,27	1813
2,33	0,1	29,16	677
2,03	0,1	27,5	720
1,72	0,1	25,63	775,6
1,42	0,1	23,62	845
1,62	0,05	24,98	779
0,558	0,05	15,8	1249
2,134	0,05	28,09	691
1,42	0,05	23,62	826

Análisis de la relevancia de la transferencia de masa en tiempos cortos

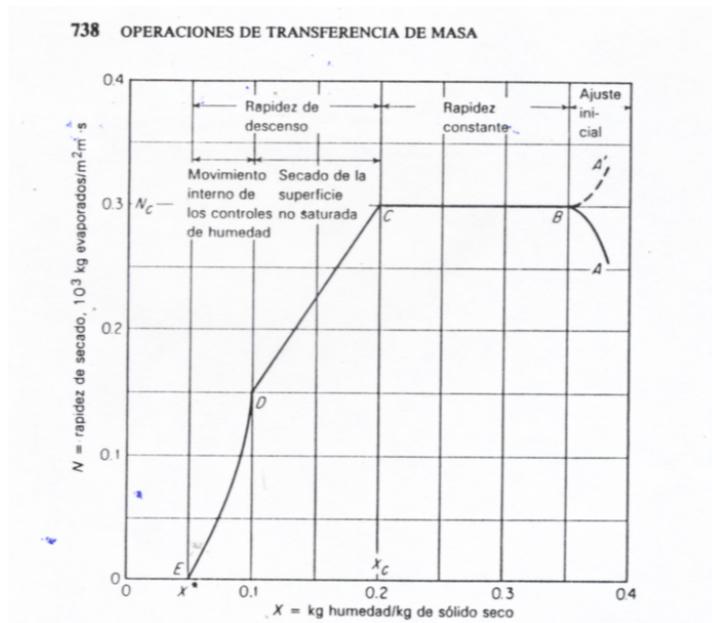


Figura 2.5 Rapidez de secado vs humedad relativa

En las curvas de rapidez se nota en la gráfica que para tiempos cortos de secado la transferencia de masa es imperceptible, en nuestras muestras los productos ya están secos, por lo tanto, no aplica la pérdida o ganancia de masa.

Determinación de la caída de presión en el sistema.

El flujo de aire que atraviesa el lecho empacado; por el efecto de las partículas o el material que comprende el lecho, percibe resistencia al flujo, que ocasiona la caída de presión en el sistema.

El flujo de aire aumenta la velocidad cuando entra en el lecho empacado, por lo tanto, existirán dos velocidades: la primera es el flujo antes de entrar en el lecho empacado y la segunda es la velocidad del flujo dentro del lecho empacado.

Para el primer análisis utilizaremos la ecuación de caída de presión siguiente:

$$\Delta P = \frac{180v\mu(1-\varepsilon)^2 * L}{\varepsilon^2 d^2} \quad \text{Ecuación 2.35}$$

ΔP =Caída de presión en el sistema

V =velocidad en vacío.

d =diámetro del grano.

L =Altura del lecho empacado

ε = francio de vacío

μ = viscosidad del fluido

Según la aplicación de la fórmula empírica, se analiza las diferentes caídas de presión; que se pueden presentar bajo los niveles de operación máximo. Estos se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 5. Resultado de la ecuación 2.3 con la caída de presión (pa) con respecto de los diámetros de la partícula (m) y la velocidad del aire (m/s)

Niveles de operación máximo

D	5,00E-03	6,00E-03	7,00E-03	8,00E-03	1,00E-02	1,20E-02	1,40E-02
V							
[m/s]							
0	0	0	0	0	0	0	0
0,5	19	13	10	8	5	3	2
1	38	27	20	15	10	7	5
1,5	58	40	29	23	14	10	7
2	77	53	39	30	19	13	10
2,5	96	67	49	38	24	17	12
3	115	80	59	45	29	20	15
3,5	135	94	69	53	34	23	17
4	154	107	79	60	38	27	20

La tabla 5 demuestra que, mientras menor sea el diámetro y mayor la velocidad, la caída de presión será mucho mayor. En este caso teóricamente la mayor alcanzada será 154 Pág.

Las ecuaciones de caída de presión que presentan Ergun, Burke-Plumber y Blake-Kozeny; no se utilizan, porque son para lechos fluidizados; y sus datos no sirven en el diseño, porque los resultados son elevados, en comparación a los datos reales en otras investigaciones similares.

Sin embargo, se realizó un pequeño análisis que se muestra:

$$\frac{\Delta P}{L} \frac{Dp}{\rho V^2} \left(\frac{\varepsilon^3}{1-\varepsilon} \right) = \frac{150}{Re_p} + 1.75 \quad 10 < Re_p < 1000$$

Ecuación 2.36

ΔP = Caída de presión en el sistema

V = velocidad en vacío.

D_p = diámetro del grano.

L = Altura del lecho empacado

ε = fracción de vacío

μ = viscosidad del fluido

ρ = Densidad del fluido

Caída de presión en columnas empacadas

El fluido (aire), en el lecho empacado, entra por la parte inferior; fluye ascendiendo a través de la columna, por la acción del ventilador, (absorción). Para mantener el flujo ascendente del aire, la presión en el extremo superior de la columna deberá ser mayor que la del fondo (parte inferior).

La caída de presión es un factor importante en el diseño de columnas empacadas. La fracción de vacío es una variable que afecta a la caída de presión debido a que el flujo ascendente del gas ocupa los espacios vacíos que se presentan entre las partículas.

El flujo del gas a través del lecho, es con frecuencia turbulento; en consecuencia, la pendiente de las curvas, tiene la tendencia a aumentar a medida que disminuye el tamaño de las partículas; la ecuación de caída de presión, teórica, predice estos resultados.

Para una velocidad constante del aire, la caída de presión aumenta, al incrementarse la altura del lecho empacado.

Cada tipo de material de partícula tiene una fracción de vacío fijo para el paso del gas, de manera que la caída de presión está sujeta al cambio de altura.

Las curvas de velocidad son variables y sus pendientes son positivas. Cuando mayor es la caída de presión, la velocidad del aire es mayor. Sin embargo, para cualquier velocidad del aire, en un lecho de altura constante, a partir de la curva de partícula menor, existe un cambio en la pendiente, que indica una mayor rapidez, en el aumento de la caída de presión; al aumentar la velocidad del aire. Este punto donde cambia la pendiente recibe el nombre de punto de carga.

Numerosos investigadores determinaron velocidades del flujo de gas, para una mejor convección entre el sólido- gas, pero en este análisis utilizaremos: los determinantes del ventilador y las propiedades físico- químicas de las partículas del lecho empacado.

Tabla 6 Resultados de la caída de presión (pa) con respecto de el diametro (m) de partícula y la velocidad del aire (m/s) en el lecho empacado meodo tradicional

Diámetro(m)	5,00E-03	6,00E-03	7,00E-03	8,00E-03	1,00E-02	1,20E-02	1,40E-02
V							
[m/s]							
0							
0,5	50	39	32	27	21	17	14
1	167	135	113	97	76	62	52
1,5	353	287	242	209	164		
2	606	496	420				
2,5	927	761					
3	1315						

La tabla de datos muestra valores extremadamente altos para los valores reales que se han obtenido.

En estos casos, no existe una teoría generalizada para los lechos empacados por esto se decide analizar cada lecho, en relación a los datos obtenidos a priori a establecer un prediseño con cierto margen de error.

La importancia es identificar, la mayor caída de presión del sistema, antes que este se convierta en lecho fluidizado. Se muestra la gráfica del comportamiento con altura de lecho constante, temperatura constante, granos constantes y una velocidad del aire incrementando desde cero hasta la velocidad máxima de fluidización.

Análisis de la velocidad mínima de fluidización

En el análisis de la velocidad mínima de fluidización; podemos observar que el lecho, sin necesidad de llegar a la fluidización se define como:

$$\text{Fuerza del peso de la cama al fluidizar} = \Delta P/A$$

Ecuación 2.37

La altura de la cama, en el punto de fluidización es L, y la fracción de Vacío es “ ε ”, se puede escribir el volumen de las partículas como

$$V = (1-\varepsilon) \cdot A \cdot L \quad \text{Ecuación 2.38}$$

La aceleración, debido a la gravedad, es la fuerza gravitatoria neta de las partículas.

El peso neto de las partículas es $= (1-\varepsilon)(\rho_p - \rho_f) A \cdot L \cdot g$

Ecuación 2.39

Donde:

ρ_p = Densidad de las partículas.

ρ_f = Densidad del fluido

A = área de la sección transversal

ε = fracción de vacío.

L = Altura del lecho empacado.

g = gravedad.

Equilibrando las dos ecuaciones tenemos:

$$\Delta P = (1-\varepsilon)(\rho_p - \rho_f) \cdot L \cdot g \quad \text{Ecuación 2.40}$$

La ecuación 2.56 relaciona ΔP con la velocidad superficial, en el primer instante de fluidización. Típicamente para una cama de partículas pequeñas ($D_p < 0.1$).

Las condiciones en el flujo, extremadamente, pequeño con $Re < 10$; utilizan las ecuaciones de Kozeny-Carman; estas se aplican, con la viscosidad del flujo, para analizar en el último punto de velocidad que mantiene fijo el lecho.

$$V_f = \frac{(\rho_p - \rho_f)gD_p^2\varepsilon^3}{150\mu(1-\varepsilon)} \quad \text{Ecuación 2.41}$$

La condición de velocidad mínima de fluidización; será la máxima de trabajo para el lecho empacado; esta será a $V_f \cong 3.9$ m/s para los productos maíz, soya y maní.

El volumen total, ocupado, por el lecho empacado es “V” y la fracción de vacío es “ ε ”, el volumen ocupado por el material o partícula es $V(1-\varepsilon)$, y el volumen de vacío es “ $V\varepsilon$ ”.

El área utilizada en la columna vacía es **A**, entonces la velocidad antes de entrar en el lecho empacado es

$$v = \frac{Q}{A} \quad \text{Ecuación 2.42}$$

Ahora se define que, para partículas esféricas el valor de $So = 6/D$ valor que ya se ha determinado.

En el caso de partículas no esféricas, con un diámetro promedio d , $So = 6/(d*\psi)$, en esta ecuación el valor de ψ , es un factor de corrección, para la forma de las partículas no esféricas.

(En el caso de partículas esféricas el valor de corrección es 1)

Los valores de S_o , Superficie por unidad de volumen y los volúmenes excluidos para: esferas, cubos, prismas, cilindros, placas, discos y otras partículas de diferentes tamaños fueron compilados por Coulson y Richardson (1978) y para la variación de la forma o el factor de forma y para algunas partículas que son esféricas fueron tabulados por Perry y Chilton.

El valor de Reynolds según la ecuación 2.59, reemplazando el valor del diámetro por S_o :

$$(\text{Re})_b = \frac{\rho v}{\mu(1-\varepsilon)S_o} \quad \text{Ecuación 2.43}$$

Donde:

ρ =. Densidad el gas.

v = velocidad del flujo de gas.

μ = viscosidad del gas.

ε = fracción de vacío.

Existe un valor de rozamiento, pero es modificado para el lecho empacado:

$$J_f = \frac{\Delta p \varepsilon^3}{L(1-\varepsilon)S_o \rho v^2} \quad \text{Ecuación 2.44}$$

Para el caso de flujo laminar donde el $Re_b < 2$ será:

$$J_f = \frac{5}{(Re)_b} \quad \text{Ecuación 2.45}$$

Cuando el conjunto de ecuaciones se resuelve y se deduce:

$$v = \frac{\varepsilon^2 \Delta p}{5S_o^2 \mu (1 - \varepsilon)^2 L} \quad \text{Ecuación 2.46}$$

En este caso se relaciona la caída de presión con la velocidad del fluido antes de entrar en el lecho empacado.

$$\Delta P = \frac{180v\mu(1 - \varepsilon)^2 * L}{\varepsilon^2 d^2} \quad \text{Ecuación 2.47}$$

La ecuación presentada, se la conoce con el nombre de Carmen-Kozeny; en esta se muestra las variables que afectan al decremento de la presión como son:

La longitud del lecho, velocidad en el vacío del flujo, viscosidad del fluido, diámetro promedio de las partículas y el factor de vacío.

Para generalizar la ecuación para las diferentes formas tamaños de las partículas se utilizará el valor de Kc. esta constante se encuentra entre los valores de 3.5 y 5.5 pero el valor más usado será el valor de 5.

$$\Delta p = K_c \mu L \frac{(1 - \varepsilon)^2 S_o^2}{\varepsilon^2} v \quad \text{Ecuación 2.48}$$

Selección del ventilador

La selección del ventilador, se utilizan las siguientes variables

ΔP , V , en el caso de la caída de presión, se utiliza los resultados de la sección 2.5 en el cual caída de presión, y el flujo masico definido en el análisis termodinámico 2.2 presente en el sistema del lecho empacado; se define por las variables fracción de vacío, volumen de control, flujo masico, diámetro de la partícula, altura del lecho, Reynolds y otros efectos parásitos que afectan a la caída de presión en los ductos, se lo considera muy pequeño, por realizarse a bajas las velocidades.

La selección del ventilador se obtiene usando la caída de presión máxima y la velocidad del flujo de aire, en el catálogo de ventiladores. En el que se utiliza la presión de 1315 Pag y la velocidad del aire 5 m/s como resultado se obtiene el ventilador centrifugo de diámetro Ø21” aproximadamente.

Diseño del banco de resistencias eléctricas.

El análisis termodinámico se realiza con una variación de masa. El aumento de la longitud del lecho se lo realiza aumentando los granos en el lecho empacado. Calculamos para una cantidad fija límite dado por el autor.

$$Q = m_{grano} C_{p_{grano}} \Delta T \quad \text{Ecuación 2.49}$$

La temperatura final del grano es 100°C, por lo tanto, la temperatura inicial del grano, es la ambiental.

La masa que se utiliza, es mayor que del diseño, también se utiliza el Cp mayor de entre los granos y el diferencial de temperatura mucho mayor que el diseño del sistema.

Este sobre-diseño, se utiliza, para controlar la velocidad del calentamiento del grano. Si este se calienta con una rapidez creciente descontrolada, se quema el producto y esto crea una capa de carbono que aumenta una resistencia anexa a la que ya tiene. Aparte que pierde todas sus propiedades nutritivas.

Las resistencias utilizadas son de 150 Kw. fabricadas

$$Q = m_{grano} C_{p_{grano}} \Delta T$$

$$M_{grano} = 2 \text{ kg}$$

$$C_p = 2.05 \text{ Kj/KgK}$$

$$T_i = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_f = 100 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T = 45 \text{ minutos}$$

$$Q = (2.05 \text{ Kj / KgK})(2 \text{ Kg})(75)$$

$$Q = 307.5 \text{ Kj}$$

$$Q/t = (307.5/0.75) = 410 \text{ KW}$$

Se tienen 4 resistencias

$$R = 410/4 = 102.5 \text{ kw}$$

Se tiene resistencias de 150 Kw.

Instrumentos de medición.

Existen algunos instrumentos entre ellos tenemos:

El multímetro digital, equipado con termocupla, este se coloca en el interior del grano, para detectar, todos, los cambios térmicos del grano.

Un Termómetro de carátula, ubicado, en la entrada del sistema, para censar, la temperatura de entrada del aire.

La probeta del tubo de Pitot, que permite evaluar la velocidad del aire y con el área de entrada, obtenemos el valor del caudal circulante por el lecho empacado.

El sistema de estabilización del flujo, es un instrumento que utiliza un tubo de sección cuadrada con una gran longitud en este caso se utilizar 3 metros, este sistema logra estabilizar el flujo de aire para que, en la toma de mediciones, no se presenten resultados inconexos.

Diseño de accesorios y componentes varios.

EL diseño de las tuberías y accesorios se realiza, sumando la resistencia del sistema de ventilación y la de los paneles de resistencias eléctricas. Las bridas del banco de resistencias eléctricas fueron diseñadas por el fabricante. Se realizo la adaptación, del banco de resistencias, el contenedor del lecho y el ventilador.

Se construyeron, reducciones de acuerdo con la necesidad del sistema.

El sistema tiene las siguientes caídas de presión.

Reducciones = 6

Longitud total de tubería =6 mts.

Perdidas en el ventilador

Perdidas en el Lecho empacado.

Perdidas en el banco de resistencia.

El sistema de tuberías, está conformado por tubería cuadrada, con un área transversal de 16 cm. X 16 cm.

Limitaciones del diseño.

La velocidad de fluidización mínima, es el límite para trabajar con lechos empacados, a partir de este limite el lecho se convierte en lecho fluidizado.

Las temperaturas superiores a 100°C, exceden la temperatura marcada como límite, este prolongado, pasado los 20 minutos puede quemar el grano. El grano evapora la única parte de líquido que le resta internamente y luego comienza a aparecer carbono en la capa superficial del grano por combustión (quemar).

La altura del lecho debe estar por arriba de los $L > 5$ cm. Si se trabaja bajo esta altura, se corre el riesgo de fluidizarse con bajas velocidades del aire.

La sensibilidad de los instrumentos que no median con precisión velocidades más bajas de 70 feet /min.

El porcentaje de error de los instrumentos viene marcado por el fabricante. Este afecta a la sensibilidad del equipo.

Las propiedades térmicas del producto, como son:

La capacidad calorífica, conductividad y difusividad térmicas.

Estas propiedades son un promedio, porque cada grano puede tener más o menos componentes químicos, que les dan estas propiedades.

La propiedad de absorción de líquidos, limita el tiempo para analizar, las muestras de la fracción de vacío, cuando los granos se encuentran sumergidos en la probeta llena de agua.

La capacidad de absorber líquidos aumenta la masa, al pesar los granos.

El Porcentaje de humedad del grano, se ha realizado mediante un análisis químico, el resultado del producto debe dar como resultado un porcentaje que estará por debajo del 13% de humedad para ser considerado deshidratado.

Diseño pruebas experimentales.

La medición del flujo de aire, se realiza en cada una de las pruebas; utilizando métodos de dinámica de fluidos. Se conoce que la diferencia entre la presión total y la presión estática dará como resultado la presión de velocidad.

Las muestras se han tomado en diferentes posiciones del ducto conductor del aire. Es necesario tener las siguientes precauciones:

- El ducto debe estar limpio
- Evitar fugas en las uniones o acoples
- Para hacer un promedio de lecturas de campo, se optimiza, formando una cruz de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo.
- Tener un ducto recto de sección transversal constante con una longitud mínima de tres metros de longitud.

La velocidad del aire se controla con un variador de frecuencia. Este variador se conecta al sistema motriz del ventilador para obtener una gama de velocidades en diferentes condiciones del lecho empacado.

Medición para flujo de aire en ductos.

El cálculo del volumen de aire que pasa a través de un conducto de sección transversal constante conocida se mide usando la media estadística de las muestras de la velocidad del aire, tomadas dentro del conducto. Luego utilizamos la siguiente ecuación:

$$Q=A.V$$

Ecuación 3.1

Donde:

Tabla 7.- Definición de las unidades y su descripción

SIMBOLO	DESCRIPCION	Unidad Inglesa	Unidad Métrica
Q	Cantidad de flujo de aire	Ft ³ /min	m ³ /s
A	Área de sección transversal.	ft ²	m ²
V	Velocidad promedio en el ducto	Ft/min	m/s

Determinación del área de la sección cruzada

El área de la sección cruzada en un conducto es el área a través de la cual fluye el aire.

Medición de velocidad de flujo de aire

La velocidad del flujo de aire en un conducto es no uniforme, a través de la sección transversal. La velocidad del aire cerca de las paredes, es menor a las que se aproximan al centro del conducto. Esto acontece por el efecto de la fricción entre el flujo de aire y las paredes.

Los codos, transiciones y alguna obstrucción, causan variaciones en la velocidad de esa sección.

La velocidad en ductos circulares se obtiene tomando las lecturas de velocidad, colocando la probeta del tubo de pitot en un agujero de diámetro Ø1/2" hecho en el conducto.

El área de sección transversal en donde se obtienen las muestras debe dividirse en igual cantidad de áreas que sean equivalentes a las presentadas en la figura.

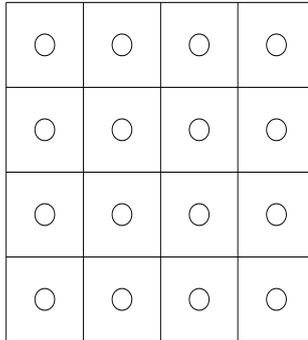


Figura 3.1 puntos sugeridos para medición

Puntos de datos en ductos cuadrados o rectangulares

En la toma de datos, de la sección rectangular, se deberá tomar al menos 16 datos y máximo 64, en los centros de cada una de las áreas distribuidas.

Promedio de las medidas tomadas.

Para la máxima exactitud se toman las siguientes precauciones:

- 1.- Los datos se toman en la sección perpendicular a la dirección del flujo de aire. El lugar que se toma la muestra deberá ser bien identificado para no repetirlo.
2. Los datos obtenidos cerca de las paredes, transiciones u obstrucciones, causan errores y confusión en las medidas.

Medición de la caída de presión en lecho empacado

Descripción general del medidor de velocidad

El medidor de velocidad es un instrumento de lectura directa; diseñada para medir velocidades de gases. Este equipo mide velocidades internamente en sistemas de ventilación o en áreas abiertas como son: humo de chimeneas, humo de parrillas, difusores, ranuras en placas de ventilación de tanques y también se usa para medir la presión estática dentro de los ductos.

El equipo consta de: la probeta del tubo de pitot como medidor de velocidad y unos sensores de presión para medir la presión estática con un rango adecuado, probetas de medición y conectores.

El velocímetro se conforma por una escala graduada calibrada para la experimentación. Este equipo permite tomar las medidas en cualquier posición.

Los medidores de velocidad están calibrados con un factor estándar, por lo tanto, todos los accesorios son intercambiables de un instrumento a otro.

En las mediciones de velocidad, se utiliza el tubo de pitot, que, dependiendo del modelo, para medir velocidades del aire, tendrá los siguientes rangos de trabajo.

El rango de selección con marca negra será el siguiente:

Tabla 8. *Definición del rango de la boquilla negra del equipo de medición*

El rango de selección con marca roja será el siguiente.

Parametros	Maximo	Minimo
Velocidad (pies/min)	125	0
	2500	0
Presion	1	0
Estatica(plg H2O)	3	0

Tabla 9. Definición del rango de la boquilla

Roja del equipo de medición

Parametros	Maximo	Minimo
Velocidad (pies/min)	5000	0
	100000	0
Presion Estatica(plg H2O)	10	0

Procedimiento para tomar medidas de presión.

- 1.- Seleccionar el lugar de acuerdo con la entrada y salida del aire en lecho empacado para obtener la presión estática adecuada.
- 2.- Ensamblar el medidor de presión, dependiendo del tipo de presión: positiva o negativa.
- 3.- El sensor de presión estática, se coloca firmemente en el agujero realizado a la entrada del aire al lecho y luego a la salida del aire del lecho, para obtener una lectura adecuada de la diferencia de presión estática focalizando la caída de presión del aire por la presencia del lecho empacado. Los sensores de etiqueta negra o roja se escogen de acuerdo con la necesidad. La magnitud de las medidas del medidor estará dada en pulgadas de agua.
- 4.- Se recolecta todas las lecturas, para diferentes velocidades del flujo de aire, diferentes alturas de lechos empacados y tres tipos diferentes de partículas.

Temperatura y presiones de corrección.

El máximo de temperatura del aire o del gas, puede ser aprobado por el medidor de velocidad es de 250^aF (120^aC). Cuando la temperatura del gas, está dentro del ducto, esta apreciable diferencia afectara al medidor de velocidad, el cual esta calibrado originalmente. Para obtener una medida

precisa se utiliza un factor de corrección, multiplicado por la velocidad obtenida en el campo.

Precisión:

Velocidad $\pm 2\%$ de toda la escala. En todos los rangos

Presión estática $\pm 5\%$ de toda la escala. En todos los rangos

Tiempo para la lectura.

De 4 a 8 segundos

Rango de escalas

Velocidad 0 a 300, 1250, 2500, 5000, 10000 FPM

Medición de temperaturas.

La medición de temperaturas se realiza con una termocupla instalada dentro de la partícula para medir la temperatura interna del grano. En los granos se obtiene un promedio de temperatura adecuado usando los granos ubicados en el centro del lecho.

Para los cálculos se asume temperatura uniforme en todo el lecho, en el momento de calentarse o enfriarse. La diferencia de temperatura entre los granos de la entrada y salida del lecho en un tiempo determinado es mínima para la altura de 150 mm.

Procedimiento para tomar medidas de temperatura.

Revisar que los equipos estén perfectamente conectados y calíbralos de acuerdo a una medida conocida o con un instrumento paralelo.

Los instrumentos de medición son:

1. Termocupla con su correspondiente extensión a un medidor de temperatura.
2. Un micrómetro.

3. La termocupla se introduce dentro de la partícula para censar la temperatura.
4. Las partículas a censar deben ser representativas del lecho.
5. La medición comienza cuando las partículas llegan a una temperatura de 100^aC y se inyecta aire a temperatura ambiente para llevarlo al equilibrio. En este momento tiempo = 0
6. Cada 5 segundos se tomará la temperatura, para más adelante analizar el comportamiento de cada partícula de acuerdo con sus propiedades térmicas.

ISBN: 978-9942-33-717-7



compAs

Grupo de capacitación e investigación pedagógica

   @grupocompas.ec
compasacademico@icloud.com