

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL

**Facultad De Ingeniería En Mecánica Y Ciencias De La
Producción**

“Determinación experimental de Correlaciones empíricas para la
transferencia de calor y caída de presión en lechos empacados de
maíz, soya y maní deshidratados”

TESIS DE GRADO

Previo a la obtención del Título de:

INGENIERO MECANICO

Presentada por:

Presley Wilson Barros Vire

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2008

DEDICATORIA.

A MI DIOS

A MIS PADRES

A MIS PROFESORES

A MIS AMIGOS

AGRADECIMIENTO.

A Dios a mis padres a mi amigo Ramiro Orozco y todas las personas que de uno u otro modo colaboraron en la realización de esta tesis.



BIBLIOTECA "GONZÁLEZ ZEVALLOS"
F. I. M. C. P.

DECLARACIÓN EXPRESA.

"La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, me corresponden exclusivamente, y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITOTAL"

(Reglamentación de Graduación de la ESPOL).

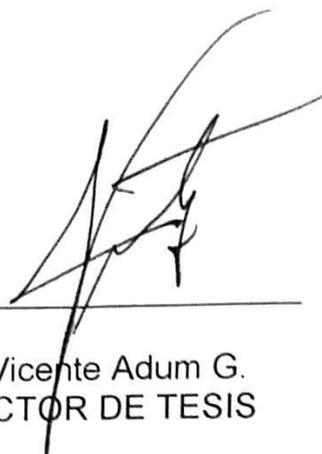


Presley Wilson Barros Vire.

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN



Ing. Dennis Rodríguez Z.
DELEGADO POR EL
DECANO DE LA FIMCP
PRESIDENTE



Ing. Vicente Adum G.
DIRECTOR DE TESIS



Ing. Mario Patiño A.
VOCAL

RESUMEN.

El presente trabajo experimental 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 soya de tal forma de lograr niveles de rendimiento y eficiencia en los diseños de equipos de enfriamiento o calentamiento para estos productos

La tesis se estructura en un orden que inicialmente se revisaran los fundamentos teóricos de los lechos empacados y basándose en esta teoría se diseñara 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 instrumento o parámetros ambientales que no pueden ser controlados. Dentro de estos parámetros se determinaran las correlaciones empíricas y los márgenes de error. Los resultados y muestras obtenidas serán analizados para llegar a conclusiones que determinaran 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 involucrara 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

	Pág.
RESUMEN.....	II
ÍNDICE GENERAL.....	IV
ABREVIATURAS.....	VII
SIMBOLOGÍA.....	IX
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XI
ÍNDICE DE TABLAS.....	XII
ÍNDICE DE PLANOS.....	XIV
INTRODUCCIÓN.....	XV
CAPITULO 1:	
1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.	
1.1 Generalidades de lechos empacados.....	1
1.2 Generalidades de productos deshidratados.....	9

CAPITULO 2.

2. DISEÑO EXPERIMENTAL.

2.1 Generalidades del equipo experimental.....	23
2.2. Análisis termodinámico del lecho empacado.....	31
2.3. Análisis de la transferencia de calor en el lecho empacado.....	36
2.4. Análisis de la relevancia de la transferencia de masa en tiempos cortos	44
2.5. Determinación de la caída de presión en el sistema.....	45
2.6. Selección del ventilador.....	58
2.7. Diseño del banco de resistencias eléctricas.....	58
2.8. Instrumentos de medición.....	60
2.9. Diseño de accesorios y componentes varios.....	61
2.10. Limitaciones del diseño.....	61

CAPITULO 3

3. DISEÑO PRUEBAS EXPERIMENTALES.

3.1. Medición de flujo de aire.....	64
3.2. Medición de la caída de presión en lecho empacado.....	67
3.3 Medición de temperaturas.....	70
3.4. Resultados experimentales.....	81

CAPITULO 4

4. CORRELACIONES EMPIRICAS.

4.1. Correlaciones para el Número de Nusselt.....	97
4.2. Correlaciones para la caída de presión.....	106
4.3 Resumen de resultados.....	113
4.4. Análisis de resultados.....	115

CAPITULO 5.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

ANEXOS.

BIBLIOGRAFÍA.

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 :	Conveccion dentro del lecho.
h_1 .	Entropía a la entrada del sistema
h_2 .	Entropía a la salida del sistema
in H_2O :	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_2O :	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

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:	Conveccion 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 numero de Reynolds
Ln (Nu)	Logaritmo natural del numero 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
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
Sp	Superficie del grano
U	Energía interna
V _c :	Volumen de un cuerpo
v:	Velocidad del aire en vacío
W:	Trabajo energía

INDICE DE FIGURAS.

		Pág.
Figura 1.1	Lecho empacado relleno.....	4
Figura 1.2	Lecho empacado poroso.....	4
Figura 1.3	Lecho poroso.....	9
Figura 2.1	Esquema del equipo	25
Figura 2.2	Esquema de la posición del lecho empacado	27
Figura 2.3	Esquema de la posición del lecho empacado.....	27
Figura 2.4	Sistema Térmico	32
Figura 2.5	Rapidez de secado vs humedad relativa.....	45
Figura 3.1	Puntos sugeridos para la medición.....	67
Figura 3.2	Datos experimentales presión del maíz.....	85
Figura 3.3	Datos experimentales presión de la soya.....	86
Figura 3.4	Datos experimentales presión de la maní.....	87
Figura 3.5	Datos experimentales temperatura del maíz L=150mm.....	88
Figura 3.6	Datos experimentales temperatura del maíz L=50mm.....	89
Figura 3.7	Datos experimentales temperatura del maíz L=100mm.....	90
Figura 3.8	Datos experimentales temperatura del maní L=100mm.....	91
Figura 3.9	Datos experimentales temperatura del maní L=50mm.....	92
Figura 3.10	Datos experimentales temperatura del maní L=150mm.....	93
Figura 3.11	Datos experimentales temperatura de soya L=150mm.....	94
Figura 3.12	Datos experimentales temperatura de soya L=100mm.....	95
Figura 3.13	Datos experimentales temperatura de soya L=50mm.....	96
Figura 4.1	Caída de presión vs velocidad del aire maní.....	107
Figura 4.2	Caída de presión vs velocidad del aire maíz.....	109
Figura 4.3	Caída de presión vs velocidad del aire soya.....	111
Figura 4.4	Relación de nusselt vs Reynolds para maní.....	116
Figura 4.5	Relación de nusselt vs Reynolds para maíz.....	118
Figura 4.6	Relación de nusselt vs Reynolds para soya.....	120

INDICE DE PLANOS.

Plano 1	Esquema de equipos medidas generales
Plano 2	lecho empacado

INDICE DE TABLAS.

		Pág.
Tabla 1	Composición química de los productos deshidratados.....	15
Tabla 2	Valores de operación en la transferencia de calor.....	34
Tabla 3	Resultados teóricos de la conveccion con respecto del aire y altura del lecho empacado maíz.....	42
Tabla 4	Resultados teóricos de la conveccion con respecto del aire y altura del lecho empacado Maní.....	44
Tabla 5	Resultados de la ecuación de caída de presión con respecto de los diámetros de la partícula y la velocidad del aire.....	47
Tabla 6	Resultados de la ecuación de caída de presión con respecto de los diámetros de la partícula y la velocidad del aire método tradicional	51
Tabla 7	Definición de las unidades y su descripción	65
Tabla 8	Definición del rango de la boquilla negra del equipo de medición.....	69
Tabla 9	Definición del rango de la boquilla roja del equipo de medición.....	69
Tabla 10	Datos de temperatura del lecho empacado del maní en función del tiempo de enfriamiento.....	73
Tabla 11	Datos de la presión obtenidos en las pruebas de maíz según la velocidad del aire y la altura del lecho empacado	82
Tabla 12	Datos de la presión obtenidos en las pruebas de Maní según la velocidad del aire y la altura del lecho empacado.....	83
Tabla 13	Datos de la presión obtenidos en las pruebas de soya según la velocidad del aire y la altura del lecho empacado	84
Tabla 14	Datos guía de las pruebas de laboratorio con maní.....	98

Tabla 15	Resultados del análisis del maíz con los parámetros de la altura del lecho y velocidad del aire que atraviesa.....	99
Tabla 16	Datos guía de las pruebas de laboratorio con maíz.....	100
Tabla 17	Resultados del análisis del maíz con los parámetros de la altura del lecho y velocidad del aire que atraviesa el lecho.....	101
Tabla 18	Datos guía de las pruebas de laboratorio de la soya	101
Tabla 19	Análisis del maíz para los parámetros altura del lecho y velocidad del aire que atraviesa el lecho.....	102

INTRODUCCION.

El presente trabajo experimental 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 soya de tal forma de lograr niveles de rendimiento y eficiencia en los diseños de equipos de enfriamiento o calentamiento para estos productos

La tesis se estructura en un orden que inicialmente se revisaran los fundamentos teóricos de los lechos empacados y basándose en esta teoría se diseñara 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 instrumento o parámetros ambientales que no pueden ser controlados. Dentro de estos parámetros se determinaran las correlaciones empíricas y los márgenes de error. Los resultados y muestras obtenidas serán analizados para llegar a conclusiones que determinaran el rendimiento y facilidad de uso de las correlaciones

CAPÍTULO 1

1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

1.1. 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 a 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.

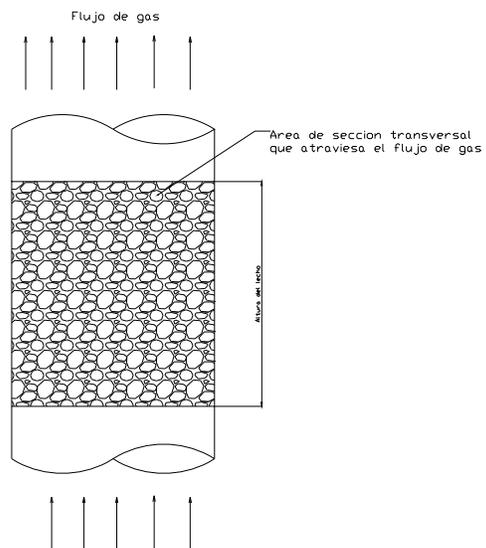


FIGURA 1.1. Lecho empacado relleno

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.

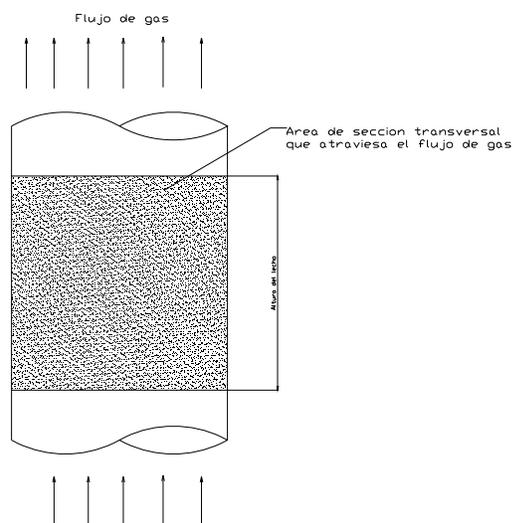


FIGURA 1.2. Lecho empacado poroso

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 características 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 en relación a su tamaño:

- Partículas grandes de diámetro mayores a 1mm
- Partículas Intermedias de diámetro que oscilan entre $40\mu\text{m}$ y 1mm
- Partículas pequeñas de diámetro menores a $40\mu\text{m}$.

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 a una estandarización de cada fabricante de tamices.

Partículas de tamaños pequeños.- Son partículas menores a $40\mu\text{m}$; 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 Prandtl, viscosidad cinemática, viscosidad dinámica, calor específico, densidad y la temperatura.

Todas las propiedades térmicas del fluido que se usan, 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.

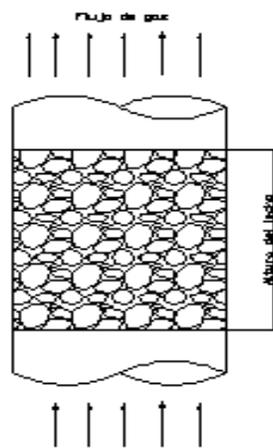


FIGURA 1.3.lecho porosos

1.2. 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
. COMPOCISION QUIMICA 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 térmica y difusividad térmica.

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}):

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

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:

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

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 ($J/kg^{\circ}C$).

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

Difusividad térmica (α).- Es la relación entre la conductividad térmica y el calor específico, por su densidad. Sus unidades son (m^2/s).

1.3 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.

$$\varepsilon = \frac{\text{Volumen_vacio_en_el_lecho_empacado}}{\text{Volumen_total}(\text{vacio} + \text{masa_particulas})}$$

Ecuación 1.23

$$\varepsilon = \frac{V_{\text{vacio}}}{V_{\text{total}}} = \frac{V_{\text{vacio}}}{V_{\text{vaacio}} + V_{\text{masaparticulas}}} \quad \text{Ecuación 1.24}$$

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

El valor fracción de vació 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:

$$\text{Densidad}_{\text{granel}} = \frac{\text{Volumen_total}(V_{\text{vacio}} + V_{\text{particula}})}{\text{Peso_total}}$$

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:

$$\varepsilon = \frac{\text{Volumen_de_espacio_vacío}}{\text{Volumen_de_la_probeta}} \quad \text{Ecuación 1.27}$$

CAPÍTULO 2

2. DISEÑO EXPERIMENTAL

2.1. Generalidades del equipo experimental

Objetivo del equipo experimental

En este capítulo, se diseña 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

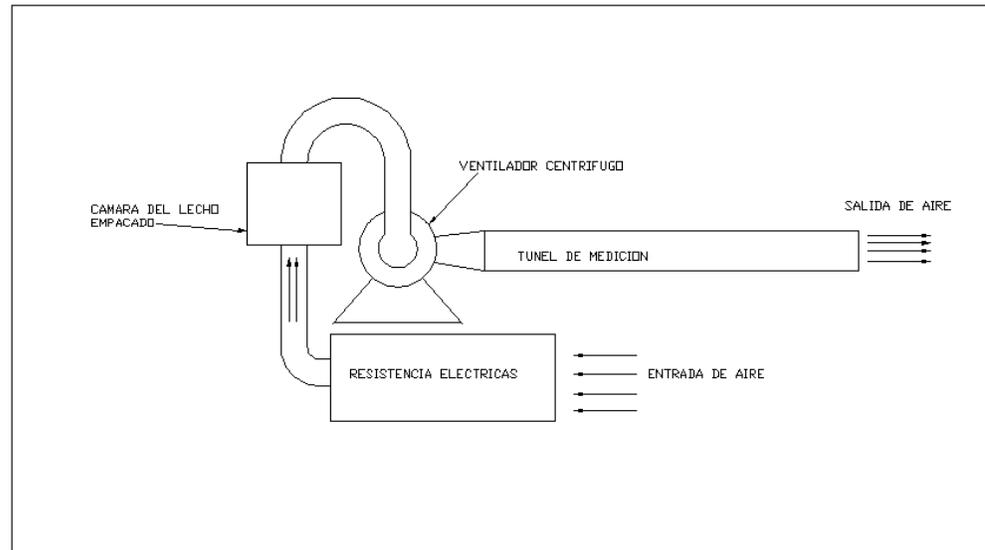


Figura 2.1. ESQUEMA DEL EQUIPO

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 perdidas 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 esta tesis 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:

$$V=0.16*0.16*0.2$$

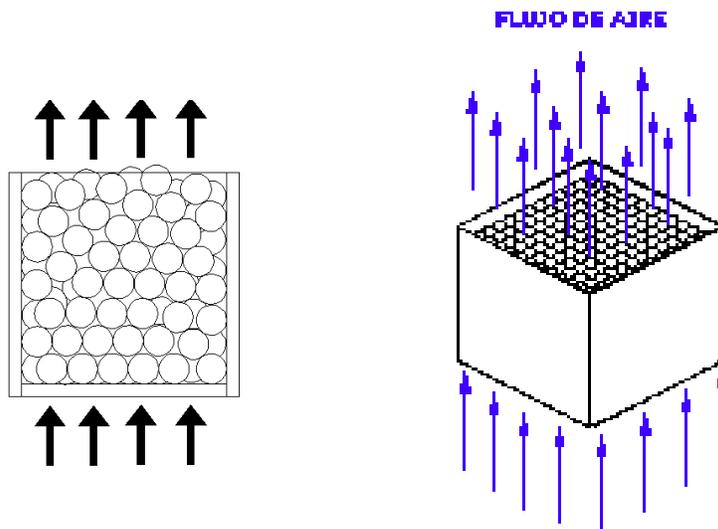
$$V=0,00512 \text{ m}^3$$

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 POSICION 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 esta 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 = $0,3 \pm 0,05$

2.2. 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.

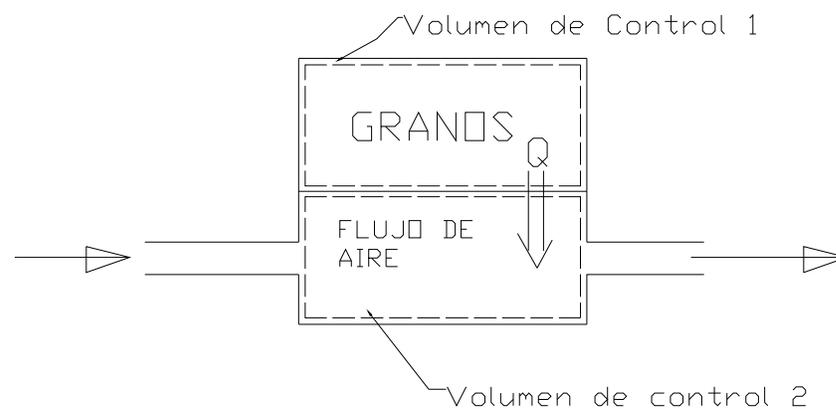


Figura 2.4 Sistema Térmico

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:

$$\dot{Q} - \cancel{\dot{W}} = \frac{dU_{VC1}}{dt} \quad \text{Ecuación 2.7}$$

$$\dot{Q} = \frac{dU_{VC1}}{dt} \quad \text{Ecuación 2.8}$$

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.

$$\dot{Q} - \cancel{\dot{W}} + \cancel{\dot{m}(h_1 - h_2)} = \frac{dU_{VC2}}{dt} \quad \text{Ecuación 2.9}$$

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

$$\frac{dU_{vc1}}{dt} = \dot{m}(h_1 - h_2) \quad \text{Ecuación 2.11}$$

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 ANALISIS 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

Cp =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:

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

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

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 transiente 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

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

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

2.3. 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 una 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 valido si $dp^* / dx^* \approx 0$ y en el caso de turbulento son validas 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 prandalt, se trabaja con el valor de 0,7. La variación de prandalt 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:

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

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 necesita 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 ($W/m^2 \cdot K$)

$A_{p,t}$ = 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 (Kg./m³)

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

$A_{c,b}$ =Área de la sección transversal del lecho empacado. (m²)

C_p =Capacidad calorífica del aire. (kJ/Kg°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:

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

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 TEORICOS DE LA CONVECCION TEORICA CON RESPECTO A LA VELOCIDAD DEL AIRE Y LA ALTURA DEL LECHO EMPACADO DE MAIZ

Velocidad aire	Altura Lecho	Conveccion Teorica
m/s	m	W/m ² -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 conveccion 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:

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

$$\frac{\rho Vc}{hA_s} \ln \frac{\theta_i}{\theta} = t \quad \text{Ecuación 2.33}$$

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 esta realizando en el proceso.

TABLA 4. RESULTADOS TEORICOS DE LA CONVECCION, TIEMPO TEORICO CON RESPECTO A LA VELOCIDAD DEL AIRE Y LA ALTURA DEL LECHO EMPACADO DE MANI

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

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

738 OPERACIONES DE TRANSFERENCIA DE MASA

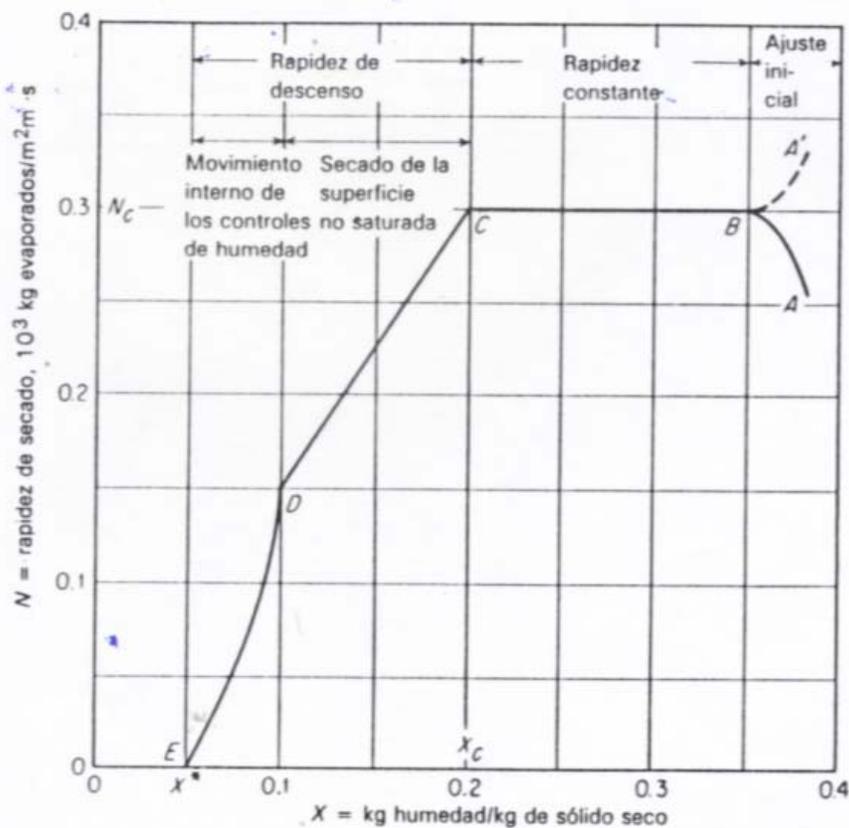


FIGURA 2.5 RAPIDEZ DE SECADO VS HUMEDAD RELATIVA

En las curvas de rapidez se nota en la grafica 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.

2.5. 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:

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

Ecuación 2.35

ΔP =Caída de presión en el sistema

V =velocidad en vació.

d =diámetro del grano.

L =Altura del lecho empacado

ε = francio de vació

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:

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

TABLA 5 RESULTADO DE LA ECUACION 2.3 CON LA CAIDA DE PRESION (pa) CON RESPECTO DE LOS DIAMETROS DE LA PARTICULA (m) Y LA VELOCIDAD DEL AIRE (m/s)

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 Pa.

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:

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

Si $10 < Re_p < 1000$

Ecuación 2.36

ΔP =Caída de presión en el sistema

V =velocidad en vació.

D_p = diámetro del grano.

L =Altura del lecho empacado

ε = francio de vació

μ = viscosidad del fluido

ρ =Densidad del fluido

CAIDA DE PRESION 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 esta 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 CAIDA DE PRESION (Pa) CON RESPECTO DE EL DIAMETRO (m) DE PARTICULA Y LA VELOCIDAD DEL AIRE (m/s) EN EL LECHO EMPACADO METODO 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 grafica del comportamiento con altura de lecho constante, temperatura constante, granos constante y una velocidad del aire incrementando desde cero hasta la velocidad máxima de fluidización.

FIGURA 2.7 DIAGRAMA DEL COMPORTAMIENTO DEL LECHO EMPACADO A DIFERENTES VELOCIDADES.

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.

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

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 "Vε".

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 So , 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 $\text{Re}_b < 2$ será:

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

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 utilizara el valor de K_c . esta constante se encuentra entre los valores de 3.5 y 5.5 pero el valor mas usado será el valor de 5.

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

2.6. 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 catalogo de ventiladores. En el que se utiliza la presión de 1315 Pa y la velocidad del aire 5 m/s como resultado se obtiene el ventilador centrifugo de diámetro Ø21" aproximadamente.

2.7. 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.

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

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

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

Mgrano=2kg

Cp=2.05 Kj/KgK

Ti=25 °C

Tf=100 °C

T= 45 minutos

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

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

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

Se tienen 4 resistencias

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

Se tiene resistencias de 150 Kw.

2.8. 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.

2.9. 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 realizó la adaptación, del banco de resistencias, el contenedor del lecho y el ventilador.

Se construyeron, reducciones de acuerdo a 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, esta conformado por tubería cuadrada, con un área transversal de 16 cm. X 16 cm.

2.10. 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 mas 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 térmica y difusividad térmica.

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.

CAPÍTULO 3

3. DISEÑO PRUEBAS EXPERIMENTALES.

3.1. Medición del flujo de aire.

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:

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

TABLA 7.- DEFINICION DE LAS UNIDADES Y SU DESCRIPCION

DETERMINACIÓN DEL AREA DE LA SECCION CRUZADA

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

MEDICION 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 obtienen tomando las lecturas de velocidad, colocando la probeta del tubo de pitot en un agujero de diámetro $\varnothing 1/2$ " 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.

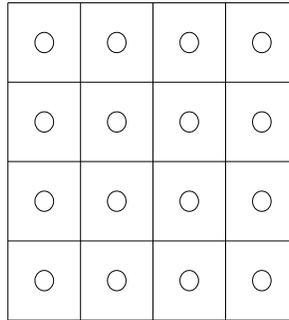


Figura 3.1 PUNTOS SUGERIDOS PARA MEDICION

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.

3.2. 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:

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

TABLA 8. DEFINICION DEL RANGO DE LA BOQUILLA NEGRA DEL EQUIPO DE MEDICION

El rango de selección con marca roja será el siguiente.

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

TABLA 9. DEFINICION DEL RANGO DE LA BOQUILLA ROJA DEL EQUIPO DE MEDICION

PROCEDIMIENTO PARA TOMAR MEDIDAS DE PRESION.

- 1.- Seleccionar el lugar de acuerdo a 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 a 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 probado por el medidor de velocidad es de 250°F (120°C). Cuando la temperatura de el gas, esta 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

3.3. 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°C y se inyecta aire a temperatura ambiente para llevarlo al equilibrio. En este momento tiempo = 0
6. Cada 5 segundos se tomara la temperatura, para más adelante analizar el comportamiento de cada partícula de acuerdo a sus propiedades térmicas.

Descripción y datos de las pruebas en el laboratorio

Las tablas siguientes muestran los datos tomados del equipo experimental en el cual la sensibilidad del tiempo es 5 segundos y el tiempo que usa el sistema, para llevar el lecho empacado de una temperatura de 100°C a la temperatura ambiente.

TABLA 10
 DATOS DE TEMPERATURA DEL LECHO EMPACADO DEL
 MANÍ EN FUNCIÓN DEL TIEMPO DE ENFRIAMIENTO.

L=150 mm
 V=80 ft/min
 To= 23°C

Tiempo (s)	Temp. Grano (°C)
0	100
5	100
10	98
15	98
20	97
25	97
30	96
35	96
40	96
45	96
50	96
55	95
60	95
65	95
70	95
75	95
80	94
85	94
90	94
95	94
100	93
105	93
110	93
115	93
120	93
125	92
130	92
135	92

Tiempo (s)	Temp. Grano (°C)
140	92
145	92
150	91
155	91
160	91
165	91
170	91
175	91
180	90
185	90
190	90
195	89
200	89
205	89
210	89
215	89
220	88
225	88
230	88
235	88
240	88
245	88
250	88
255	87
260	87
265	87
270	87
275	86
280	86

Tiempo (s)	Temp. Grano (°C)
285	86
290	86
295	85
300	85
305	85
310	85
315	85
320	84
325	84
330	84
335	84
340	84
345	84
350	84
355	83
360	83
365	82
370	82
375	82
380	82
385	82
390	81
395	81
400	81
405	81
410	80
415	80
420	80
425	80

TABLA 10
(CONTINUA)

Datos de temperatura del lecho empacado del maní en función del tiempo de enfriamiento.

L=150 mm
V=80 ft/min
T_o= 23°C

Tiempo (s)	Temp. Grano (°C)
430	80
435	79
440	79
445	79
450	79
455	79
460	78
465	78
470	78
475	77
480	77
485	77
490	77
495	77
500	76
505	76
510	76
515	76
520	76
525	76
530	75
535	75
540	75
545	75
550	75
555	75
560	74
565	74
570	73

Tiempo (s)	Temp. Grano (°C)
575	73
580	73
585	73
590	72
595	72
600	72
605	72
610	72
615	71
620	71
625	71
630	71
635	70
640	70
645	70
650	70
655	69
660	69
665	69
670	69
675	69
680	68
685	68
690	68
695	68
700	68
705	67

Tiempo (s)	Temp. Grano (°C)
710	67
715	67
720	67
725	66
730	66
735	66
740	66
745	66
750	66
755	65
760	65
765	65
770	65
775	64
780	64
785	64
790	64
795	63
800	63
805	63
810	63
815	62
820	62
825	62
830	62
835	62
840	61

TABLA 10
(CONTINUA)

Datos de temperatura del lecho empacado del maní en función del tiempo de enfriamiento.

L=150 mm
V=80 ft/min
To= 23°C

Tiempo (s)	Temp. Grano (°C)
845	61
850	61
855	61
860	61
865	60
870	60
875	60
880	60
885	60
890	59
895	59
900	59
905	59
910	58
915	58
920	58
925	58
930	58
935	58
940	57
945	57
950	57
955	57
960	56

Tiempo (s)	Temp. Grano (°C)
965	56
970	56
975	56
980	56
985	56
990	55
995	55
1000	55
1005	55
1010	54
1015	54
1020	54
1025	54
1030	53
1035	53
1040	53
1045	53
1050	53
1055	52
1060	52
1065	52
1070	52
1075	52
1080	52

Tiempo (s)	Temp. (°C)
1085	51
1090	51
1095	51
1100	51
1105	51
1110	50
1115	50
1120	50
1125	50
1130	50
1135	50
1140	49
1145	49
1150	49
1155	49
1160	49
1165	48
1170	48
1175	48
1180	48
1185	48
1190	48
1195	47
1200	47

TABLA 10
(CONTINUA)

Datos de temperatura del lecho empacado del maní en función del tiempo de enfriamiento.

L=150 mm
V=80 ft/min
To= 23°C

Tiempo (s)	Temp. Grano (°C)
1205	47
1210	47
1215	47
1220	46
1225	46
1230	46
1235	46
1240	46
1245	45
1250	45
1255	45
1260	45
1265	45
1270	45
1275	45
1280	44
1285	44
1290	44
1295	44
1300	44
1305	44
1310	43
1315	43

Tiempo (s)	Temp. Grano (°C)
1320	43
1325	43
1330	43
1335	43
1340	43
1345	42
1350	42
1355	42
1360	42
1365	42
1370	42
1375	42
1380	41
1385	41
1390	41
1395	41
1400	41
1405	41
1410	40
1415	40
1420	40
1425	40
1430	40

Tiempo (s)	Temp. Grano (°C)
1435	40
1440	40
1445	40
1450	39
1455	39
460	39
1465	39
1470	39
1475	39
1480	39
1485	39
1490	39
1495	38
1500	38
1505	38
1510	38
1515	38
1520	38
1525	38
1530	37
1535	37
1540	37
1545	37

TABLA 10
(CONTINUA)

Datos de temperatura del lecho empacado del maní en función del tiempo de enfriamiento.

L=150 mm
V=80 ft/min
To= 23^aC

Tiempo (s)	Temp. Grano (°C)
1550	37
1555	37
1560	37
1565	37
1570	36
1575	36
1580	36
1585	36
1590	36
1595	36
1600	36
1605	36
1610	36
1615	36
1620	36
1625	35
1630	35
1635	35
1640	35
1645	35
1650	35
1655	35
1660	35
1665	35

Tiempo (s)	Temp. Grano (°C)
1670	35
1675	34
1685	34
1690	34
1695	34
1700	34
1705	34
1710	34
1715	34
1720	33
1725	33
1730	33
1735	33
1740	33
1745	33
1750	33
1755	33
1760	33
1765	33
1770	33
1775	33
1780	32
1785	32
1790	32

Tiempo (s)	Temp. Grano (°C)
1795	32
1800	32
1805	32
1810	32
1815	32
1820	32
1825	32
1830	32
1835	32
1840	32
1845	31
1850	31
1855	31
1860	31
1865	31
1870	31
1875	31
1880	31
1885	31
1890	31
1895	31
1900	31
1905	31
1910	31
1915	30

TABLA 10.
(CONTINUA)

Datos de temperatura del lecho empacado del maní en función del tiempo de enfriamiento.

L=150 mm
V=80 ft/min
T₀= 23°C

Tiempo (s)	Temp. Grano (°C)
1920	30
1925	30
1930	30
1935	30
1940	30
1945	30
1950	30
1955	30
1960	30
1965	30
1970	30
1975	30
1980	30
1985	30
1990	30
1995	30
2000	30
2005	29
2010	29
2015	29
2020	29
2025	29
2030	29
2035	29

Tiempo (s)	Temp. Grano (°C)
2040	29
2045	29
2050	29
2055	29
2060	29
2065	29
2070	29
2075	29
2080	29
2085	29
2090	29
2095	28
2100	28
2105	28
2110	28
2115	28
2120	28
2125	28
2130	28
2135	28
2140	28
2145	28
2150	28
2155	28

Tiempo (s)	Temp. Grano (°C)
2160	28
2165	28
2170	28
2175	28
2180	28
2185	28
2190	28
2195	27
2200	27
2205	27
2210	27
2215	27
2220	27
2225	27
2230	27
2235	27
2240	27
2245	27
2250	27
2255	27
2260	27
2265	27
2270	27
2275	27
2280	27

TABLA 10.
(CONTINUA)

Datos de temperatura del lecho empacado del maní en función del tiempo de enfriamiento.

L=150 mm
V=80 ft/min
To= 23°C

Tiempo (s)	Temp. Grano (°C)
2285	27
2290	27
2295	27
2300	27
2305	27
2310	27
2315	27
2320	27
2325	27
2330	27
2335	26
2340	26
2345	26
2350	26
2355	26
2360	26
2365	26
2370	26
2375	26
2380	26
2385	26
2390	26
2395	26
2400	26

Tiempo (s)	Temp. Grano (°C)
2405	26
2410	26
2415	26
2420	26
2425	26
2430	26
2435	26
2440	26
2445	26
2450	26
2455	26
2460	26
2465	26
2470	26
2475	26
2480	26
2485	26
2490	26
2495	26
2500	26
2505	26
2510	26
2515	25
2520	25
2525	25

Tiempo (s)	Temp. Grano (°C)
2530	25
2535	25
2540	25
2545	25
2550	25
2555	25
2560	25
2565	25
2570	25
2575	25
2580	25
2585	25
2590	25
2595	25
2600	25
2605	25
2610	25
2615	25
2620	25
2625	25
2630	25
2635	25
2640	25
2645	25

TABLA 10.
(CONTINUA)

Datos de temperatura del lecho empacado del maní en función del tiempo de enfriamiento.

L=150 mm
V=80 ft/min
To= 23°C

Tiempo (s)	Temp. Grano (°C)
2650	25
2655	25
2660	25
2665	25
2670	25
2675	25
2680	25
2685	25
2690	25
2695	25
2700	25
2705	25
2710	25
2715	25
2720	25
2725	25
2730	25
2735	25
2740	25
2745	25
2750	25
2755	25
2760	25
2765	25
2770	25

2775	25
2780	25
2785	25
2790	24

3.4. Resultados experimentales.

Esta sección se muestra los resultados obtenidos en los equipos de medición, en las diferentes circunstancias ambientales, para los tres tipos de granos que conformaron los lechos empacados parámetros diferentes.

TABLA 11 DATOS DE LA PRESION OBTENIDOS EN LAS PRUEBAS DE MAIZ .SEGUN LA VELOCIDAD DEL AIRE Y LA ALTURA DEL LECHO EMPACADO

L=150mm		L=120mm		L=100mm		L=70mm		L=50mm		L=40mm	
V	Presión	V	Presión	V	Presión	V	Presión	V	Presión	V	Presión
(m/s)	(N/m ²)	(m/s)	(N/m ²)	(m/s)	(N/m ²)	(m/s)	(N/m ²)	(m/s)	(N/m ²)	(m/s)	(N/m ²)
3,15	373,62	2,74	448,34	2,74	423,44	3,05	398,53	3,05	298,90	2,95	249,08
2,44	298,90	2,29	298,90	2,39	273,99	2,54	249,08	2,29	159,41	2,34	159,41
2,03	159,41	1,63	194,28	1,83	186,81	1,85	159,41	1,63	89,67	1,78	89,67
1,68	87,18	1,52	139,48	1,63	92,16	1,68	89,67	0,51	39,85	0,71	37,36
0,46	37,36	0,51	39,85	0,41	37,36	0,56	37,36			0,38	3,24
				0,30	7,47						

TABLA 12. DATOS DE LA PRESION OBTENIDOS EN LAS PRUEBAS DE LA MANI .SEGUN LA VELOCIDAD DEL AIRE Y LA ALTURA DEL LECHO EMPACADO

L=150mm		L=120mm		L=100mm		L=70mm		L=50mm		L=30mm	
V	Presión	V	Presión	V	Presión	V	Presiona	V	Presión	V	Presión
(m/s)	(N/m ²)	(m/s)	(N/m ²)	(m/s)	(N/m ²)	(m/s)	(N/m ²)	(m/s)	(N/m ²)	(m/s)	(N/m ²)
3,25	398,53	3,05	423,436	3,10	373,62	2,95	423,436	3,05	423,436	2,34	159,411
2,54	273,99	2,64	273,988	2,64	249,08	2,44	273,988	2,54	273,988	1,88	89,6688
2,03	159,41	2,24	159,4112	2,03	159,411	1,93	159,4112	2,03	159,411	0,71	37,362
1,73	89,67	1,88	89,6688	1,68	89,6688	1,63	89,6688	1,63	89,6688	0,46	4,9816
0,51	37,36	0,51	37,362	0,41	37,362	0,51	29,8896	0,51	29,8896		
						0,36	4,9816	0,36	4,9816		

TABLA 3.2

TABLA 13. DATOS DE LA PRESION OBTENIDOS EN LAS PRUEBAS DE LA SOYA .SEGUN LA VELOCIDAD DEL AIRE Y LA ALTURA DEL LECHO EMPACADO

L=200mm		L=150mm		L=130mm		L=100mm		L=50mm		L=30mm	
V	Presión	V	Presión	V	Presión	V	Presión	V	Presión	V	Presión
(m/s)	(N/m ²)	(m/s)	(N/m ²)	(m/s)	(N/m ²)						
2,95	423,44	3,05	448,35	2,95	398,53	3,25	423,44	2,95	373,62	2,03	112,09
2,74	298,90	2,64	323,81	2,64	273,99	2,79	298,90	2,69	249,08	1,83	89,67
1,83	161,90	1,83	161,90	1,93	161,90	2,29	159,41	2,24	154,43	1,52	37,36
1,63	92,16	1,63	92,16	1,73	89,67	1,83	94,65	1,83	89,67	0,46	7,47
0,51	39,85	0,51	37,36	0,46	37,36	0,51	42,34	0,58	34,87		
0,36	7,47	0,36	7,47	0,36	7,97	0,36	3,74	0,38	4,98		

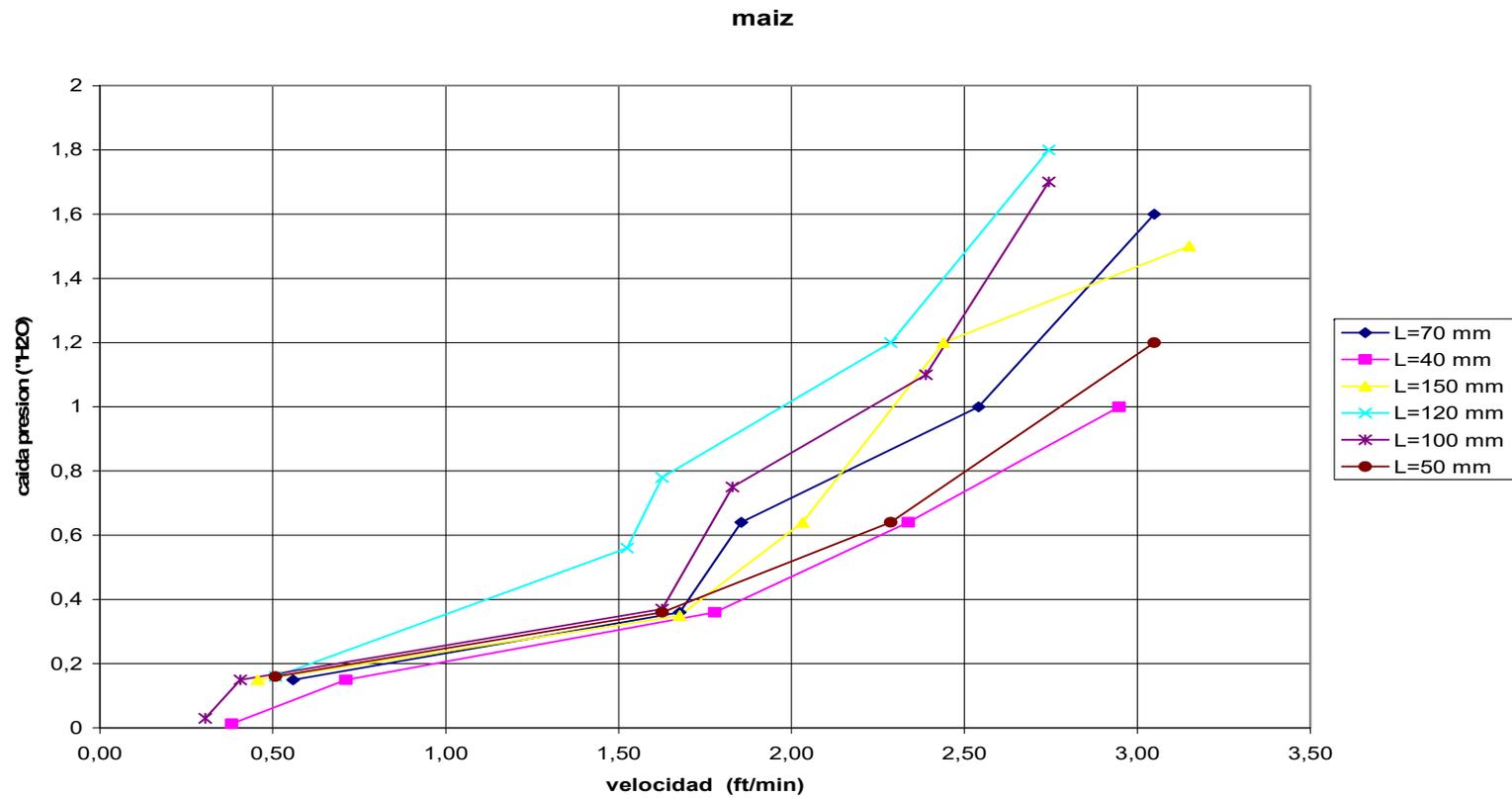


Figura 3.2 La grafica muestra los datos obtenidos de la práctica de laboratorio y muestra como para diferentes alturas del lecho empacado y la misma velocidad la presión es diferente

SOYA

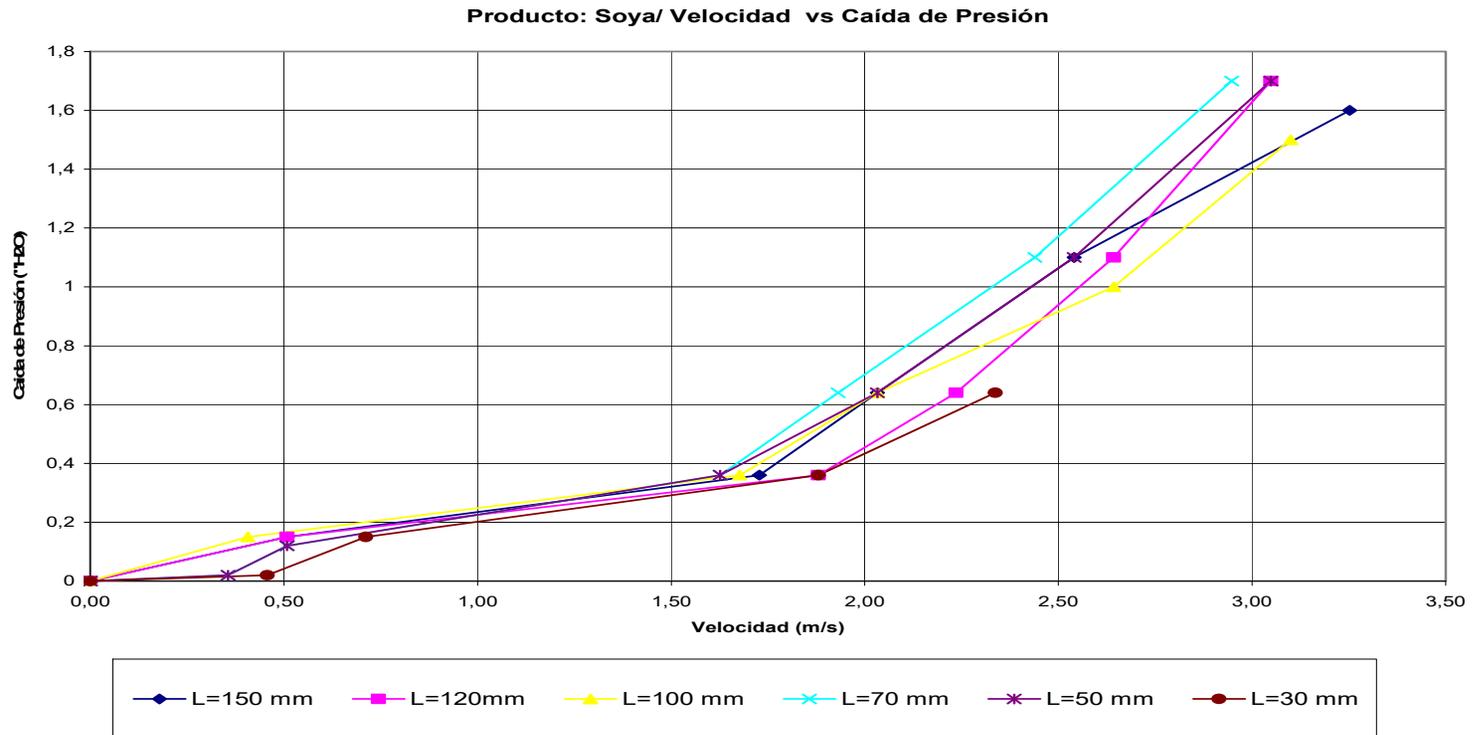


Figura 3.3 La grafica muestra los datos obtenidos de la práctica de laboratorio y muestra como para diferentes alturas del lecho empacado y la misma velocidad la presión es diferente

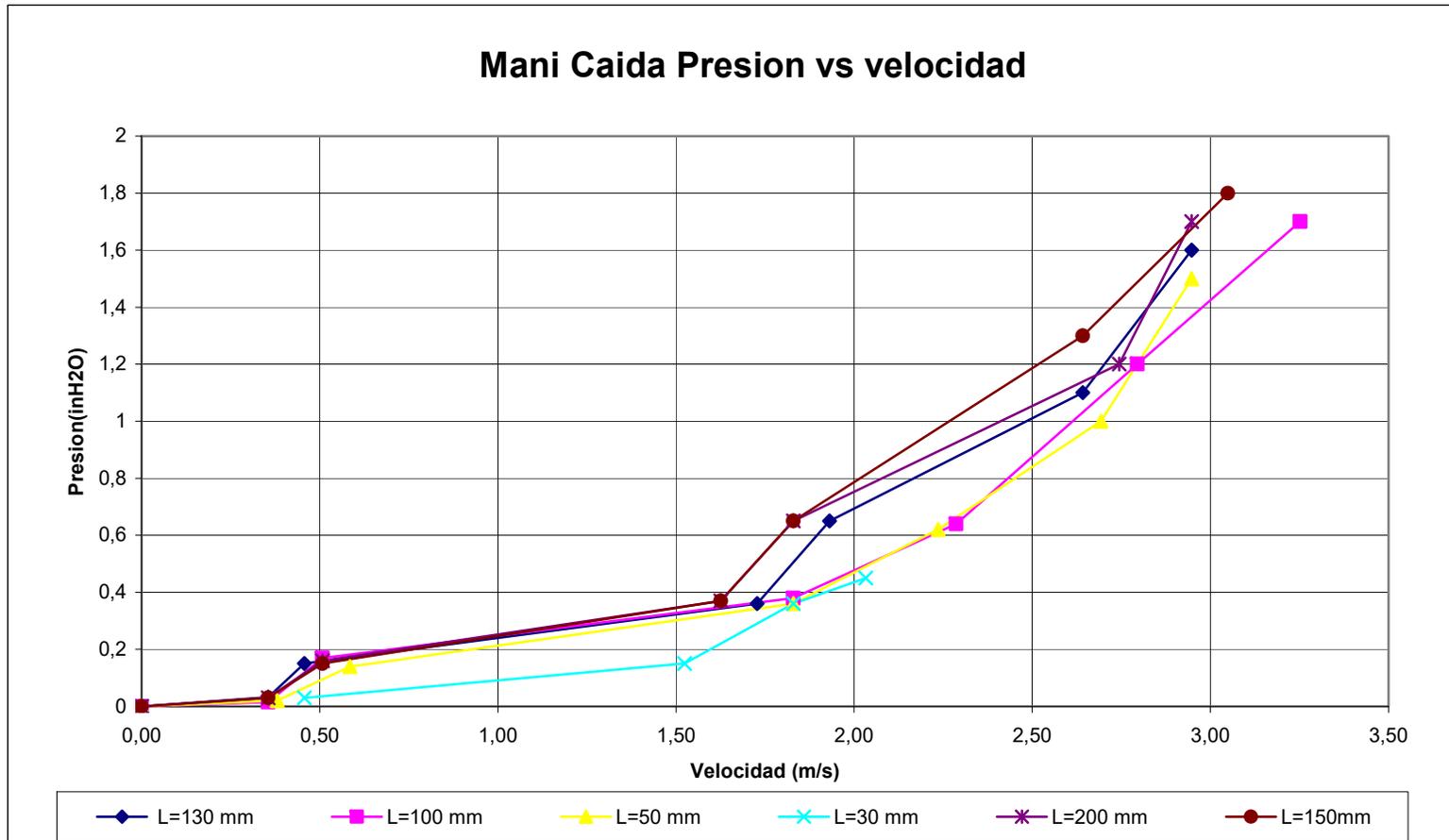


Figura 3.4 La grafica muestra los datos obtenidos de la práctica de laboratorio y muestra como para diferentes alturas del lecho empacado y la misma velocidad la presión es diferente

producto: maiz altura de lecho: 1. 150mm To: 23°C Tamb: 23°C

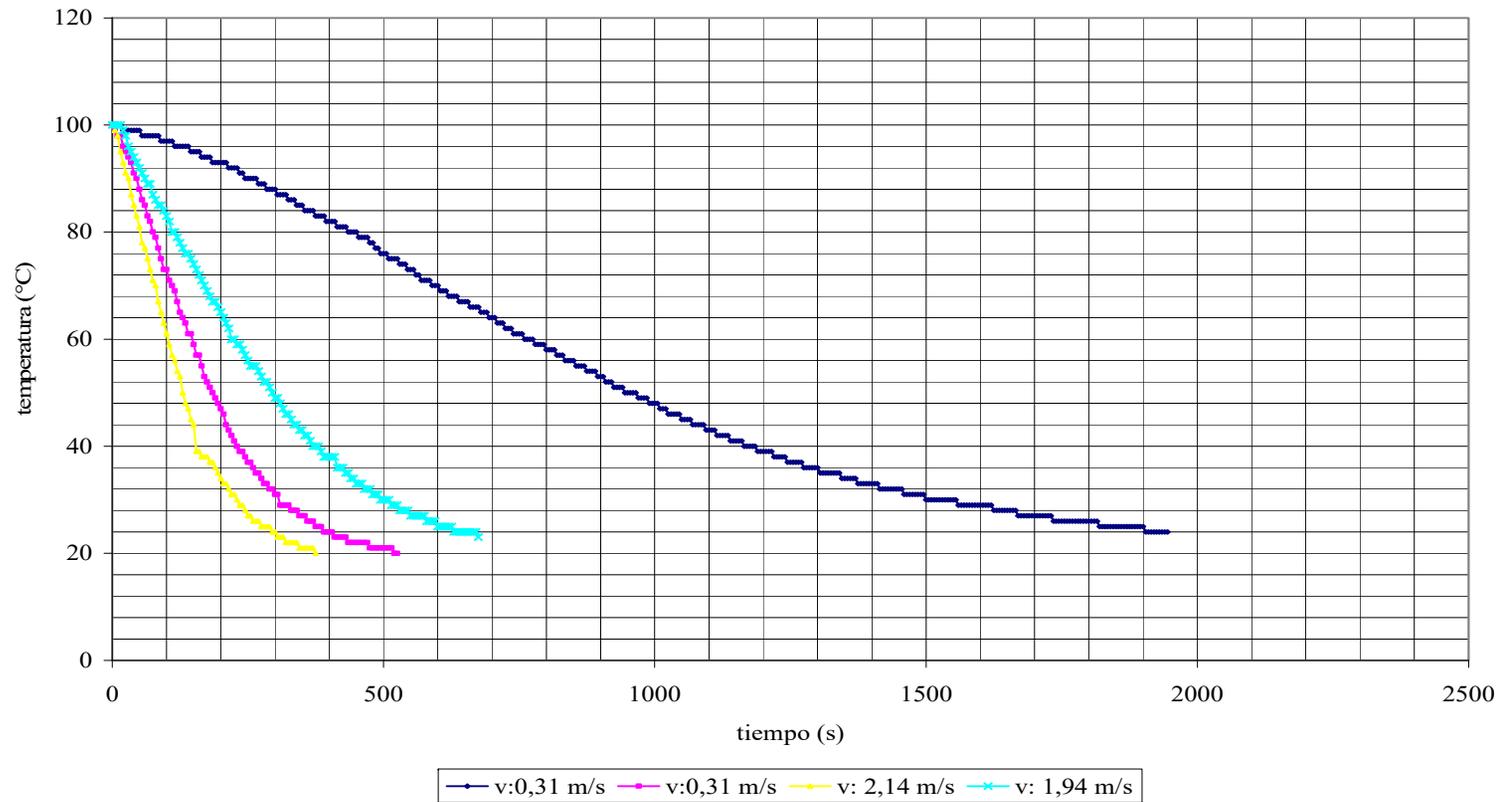


Figura 3.5 La grafica muestra los datos obtenidos de la práctica de laboratorio y muestra como para diferentes alturas del lecho empacado y la misma velocidad la temperatura es diferente

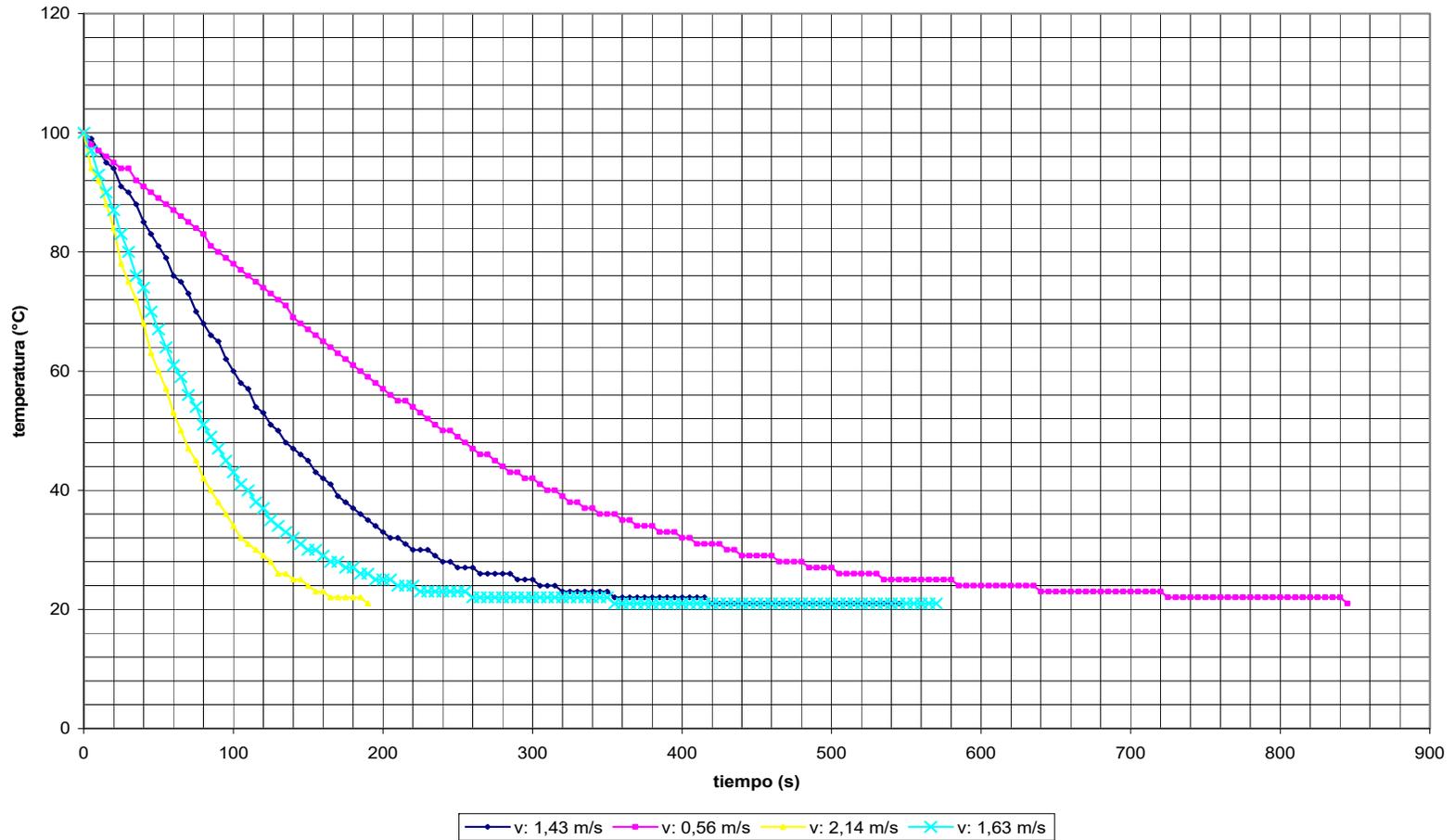


Figura 3.6 La grafica muestra los datos obtenidos de la práctica de laboratorio y muestra como para diferentes alturas del lecho empacado y la misma velocidad la temperatura es diferente

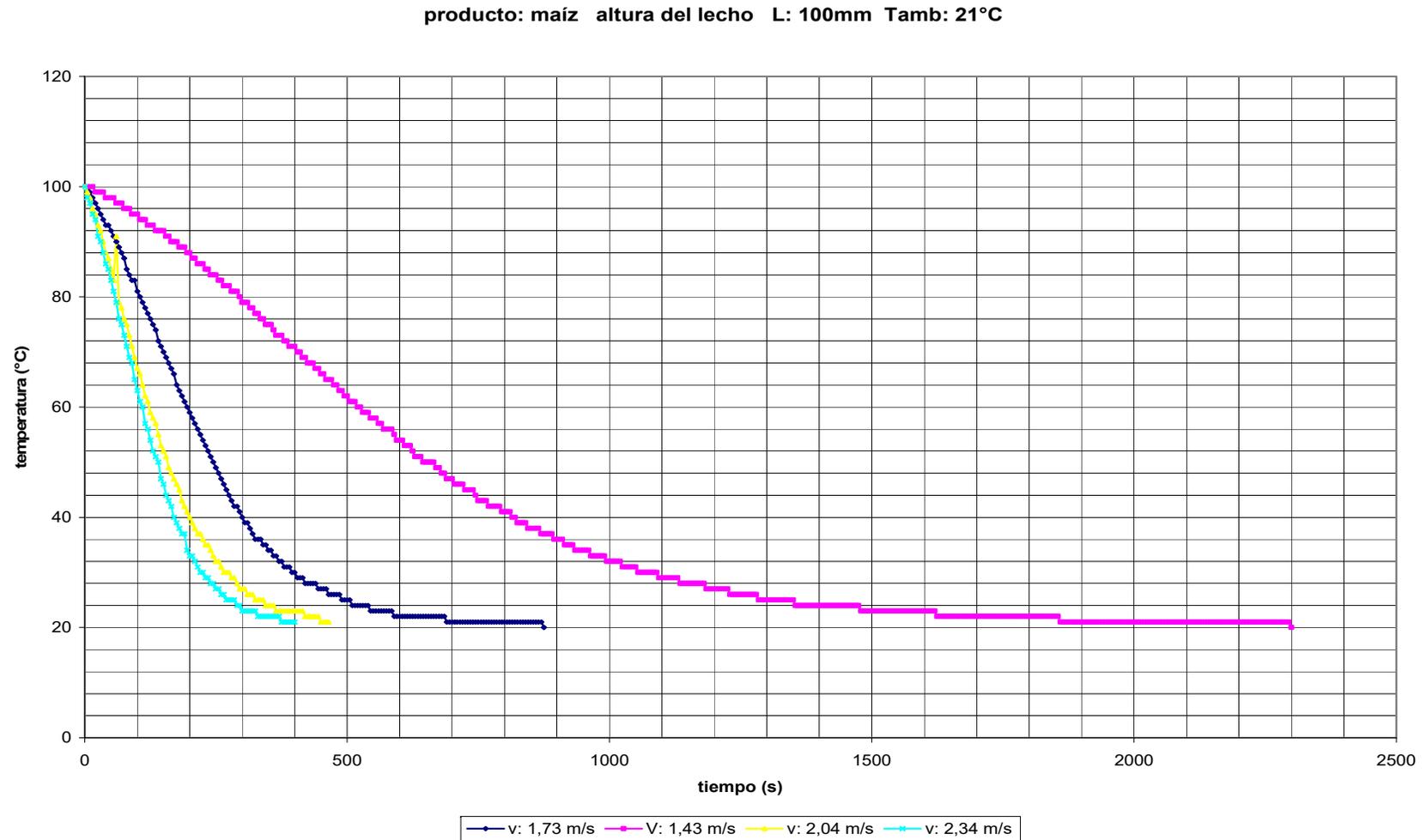


Figura 3.7 La grafica muestra los datos obtenidos de la práctica de laboratorio y muestra como para diferentes alturas del lecho empacado y la misma velocidad la temperatura es diferente

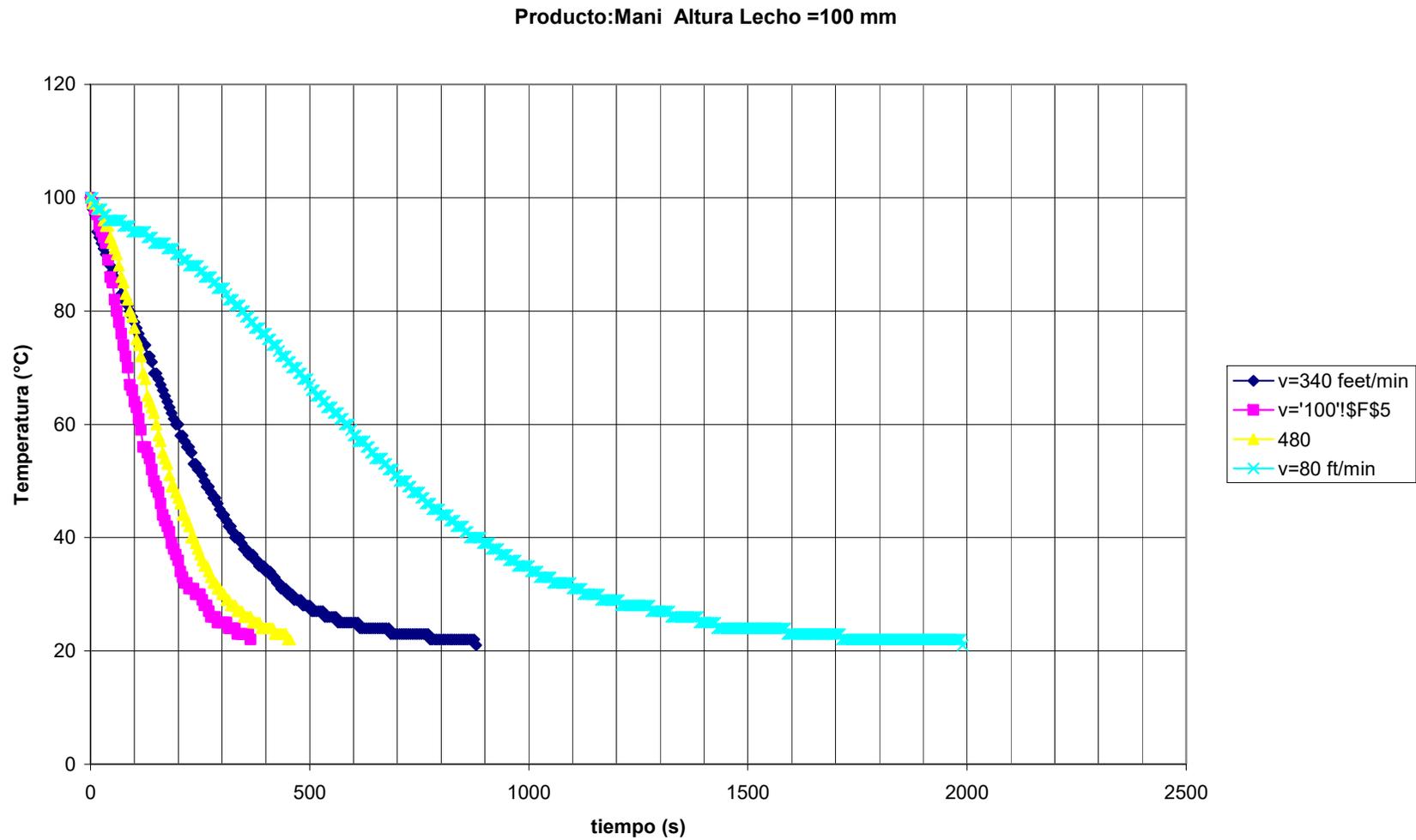


Figura 3.8 La grafica muestra los datos obtenidos de la práctica de laboratorio y muestra como para diferentes alturas del lecho empacado y la misma velocidad la temperatura es diferente

PRODUCTO:MANI ALTURA DEL LECHO L=50mm
T0=21 °C Tamb=22°C

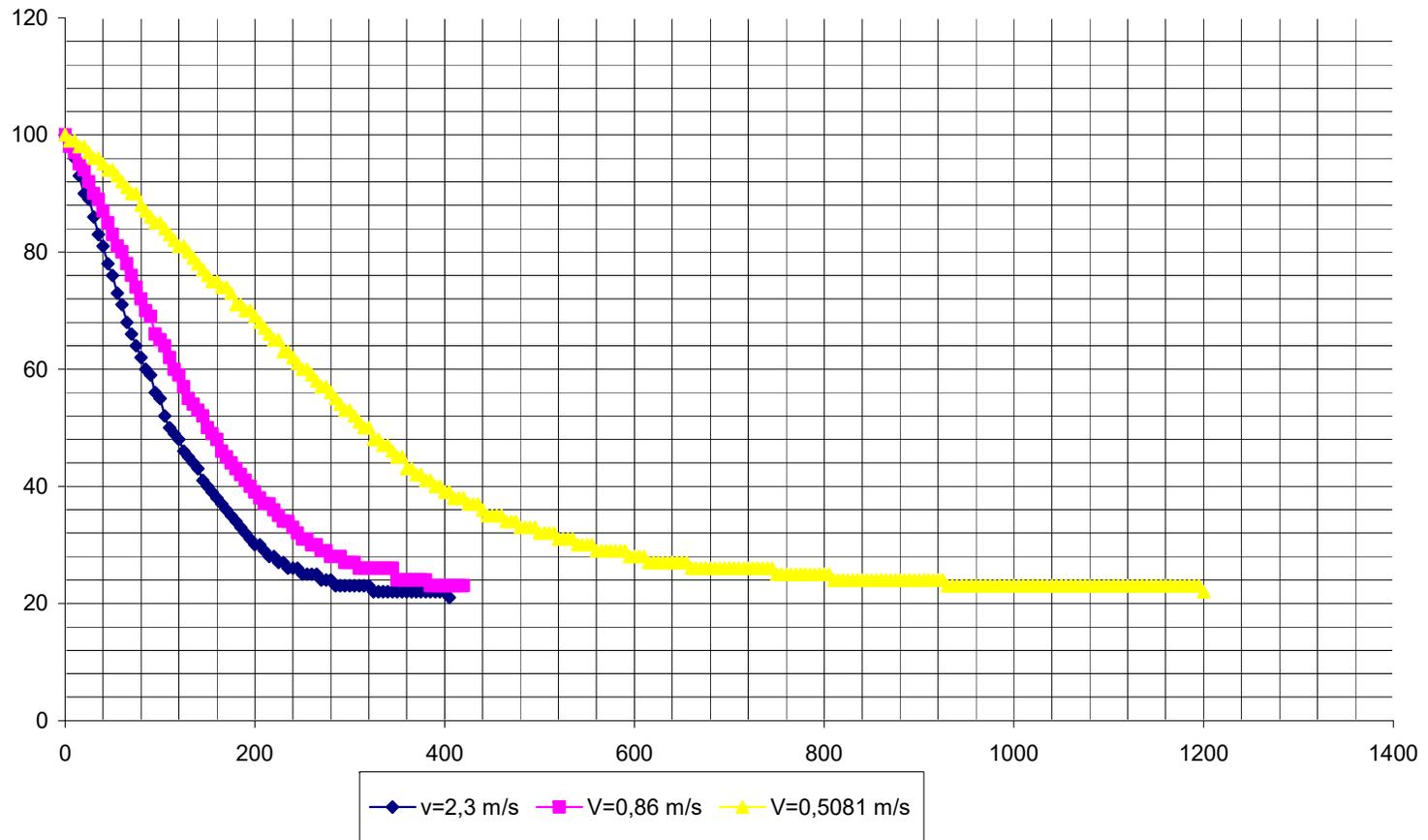


Figura 3.9 La grafica muestra los datos obtenidos de la práctica de laboratorio y muestra como para diferentes alturas del lecho empacado y la misma velocidad la temperatura es diferente

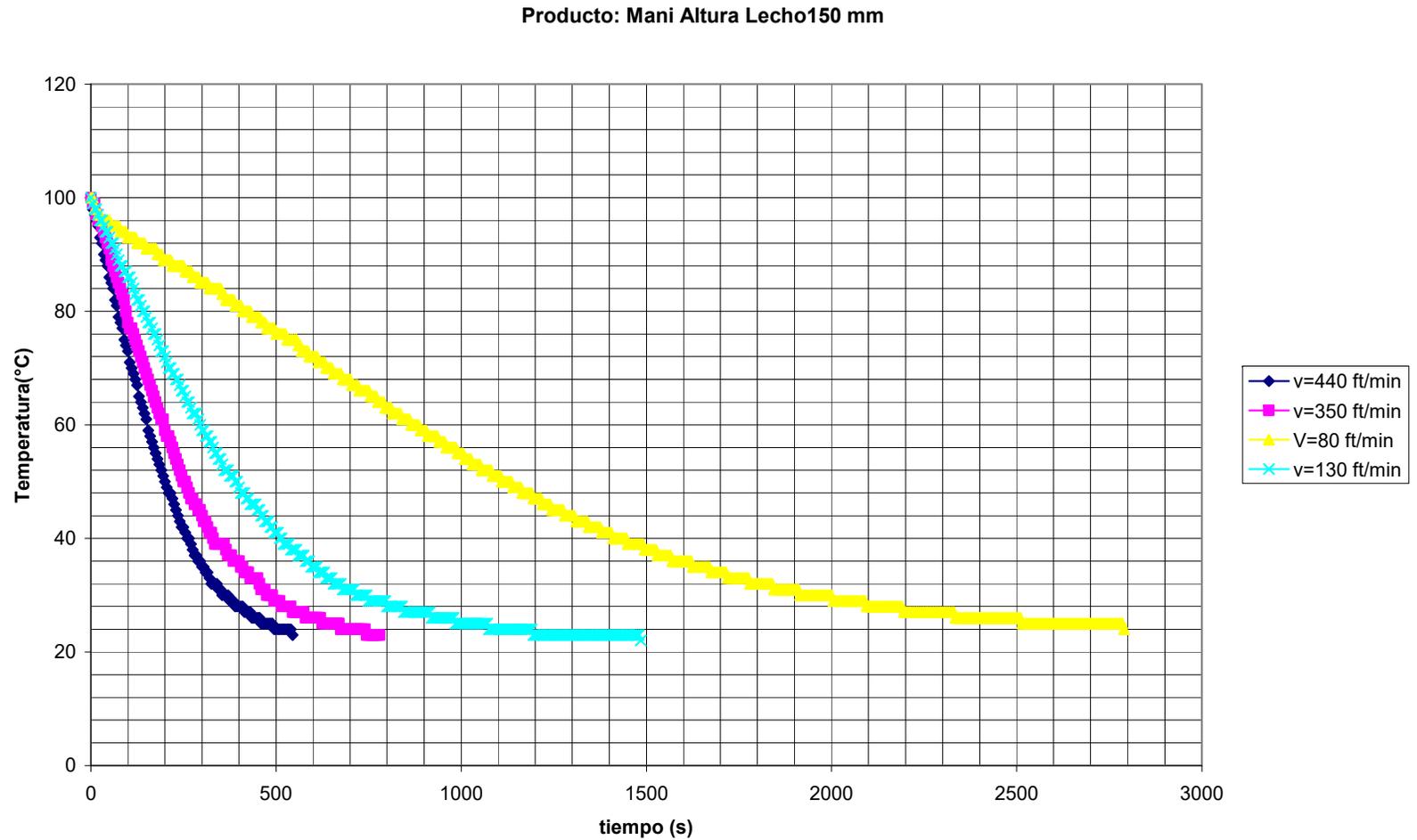


Figura 3.10 La grafica muestra los datos obtenidos de la práctica de laboratorio y muestra como para diferentes alturas del lecho empacado y la misma velocidad la temperatura es diferente

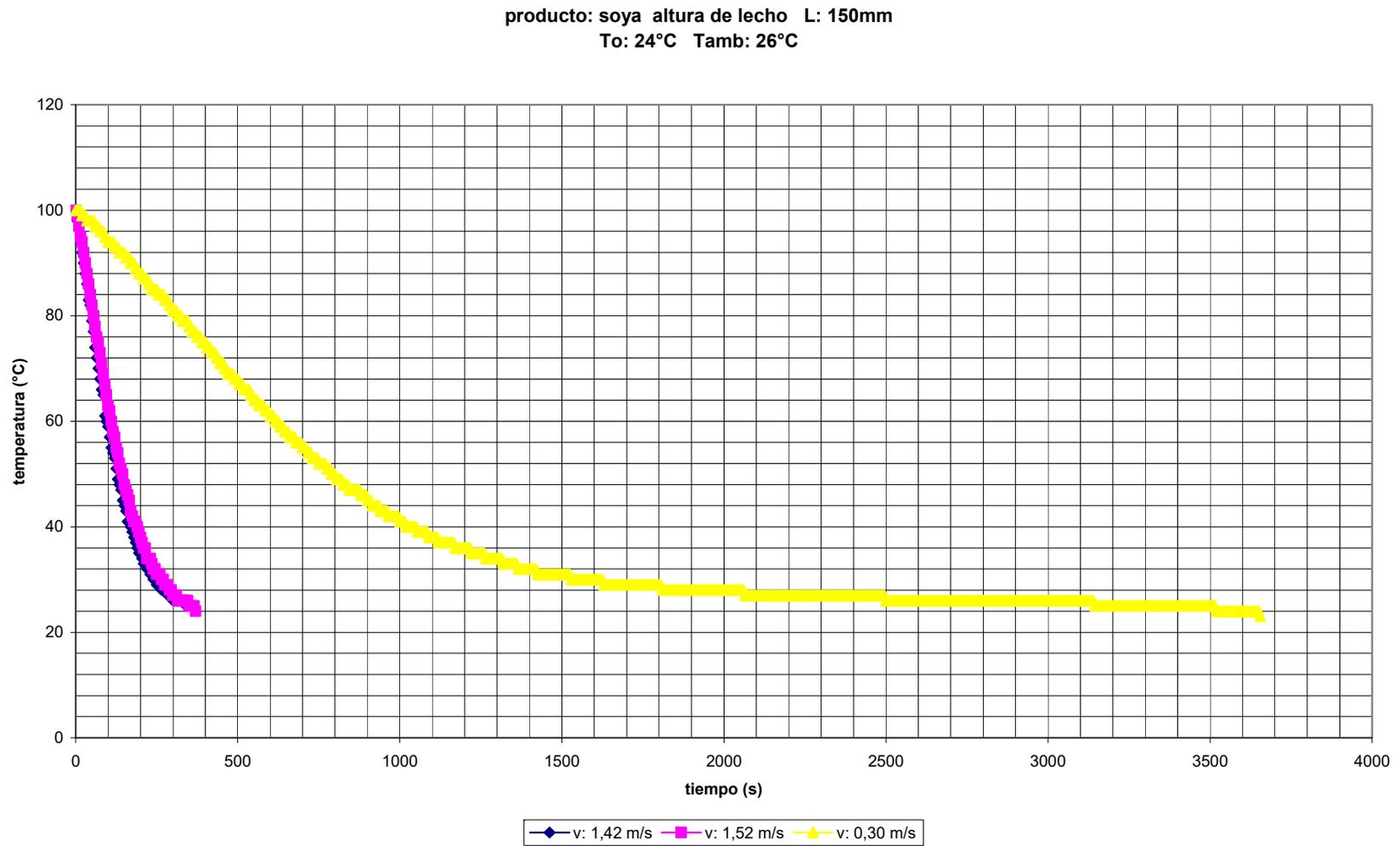


Figura 3.11 La grafica muestra los datos obtenidos de la práctica de laboratorio y muestra como para diferentes alturas del lecho empacado y la misma velocidad la temperatura es diferente

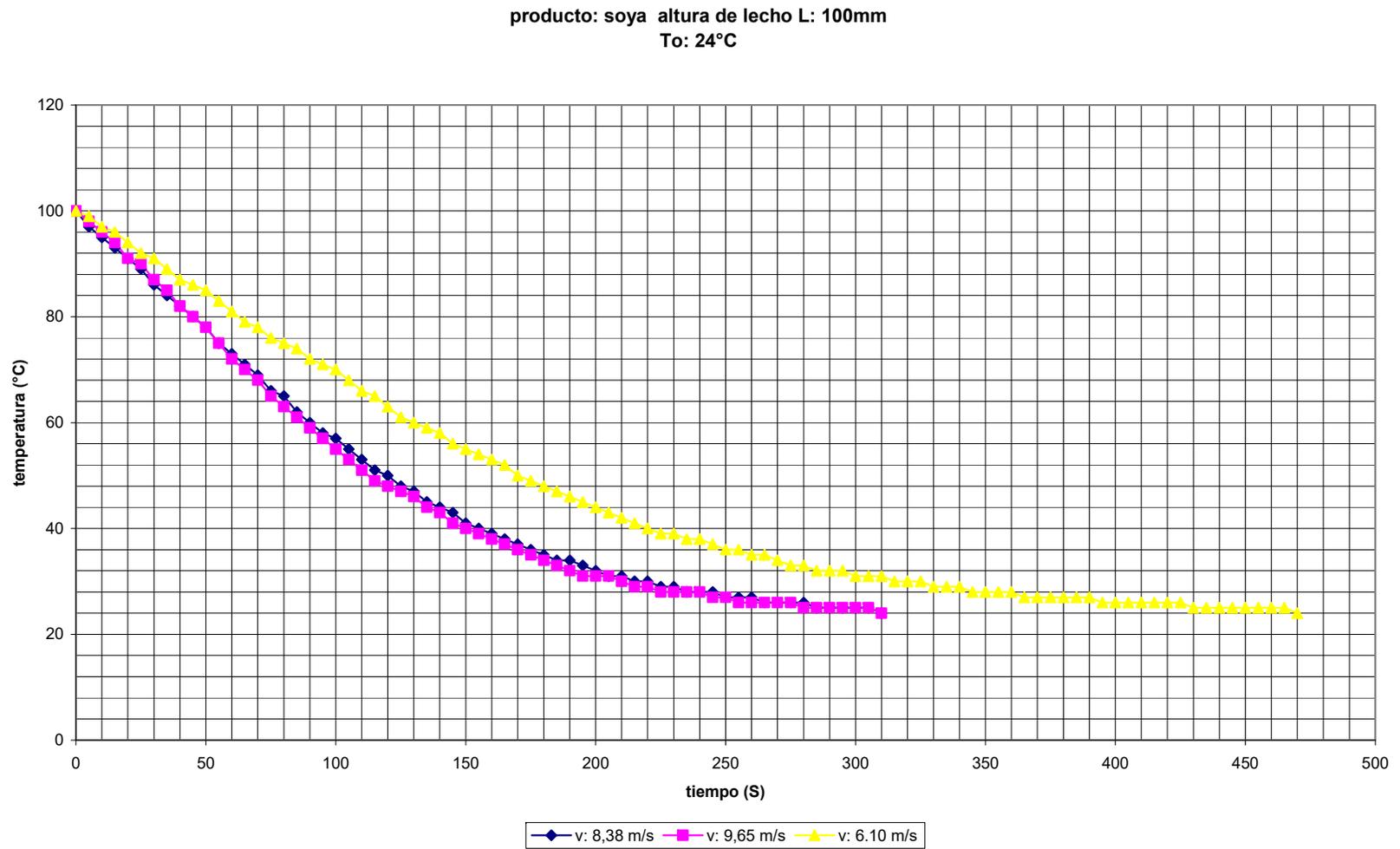


Figura 3.12 La grafica muestra los datos obtenidos de la práctica de laboratorio y muestra como para diferentes alturas del lecho empacado v la misma velocidad la temperatura es diferente

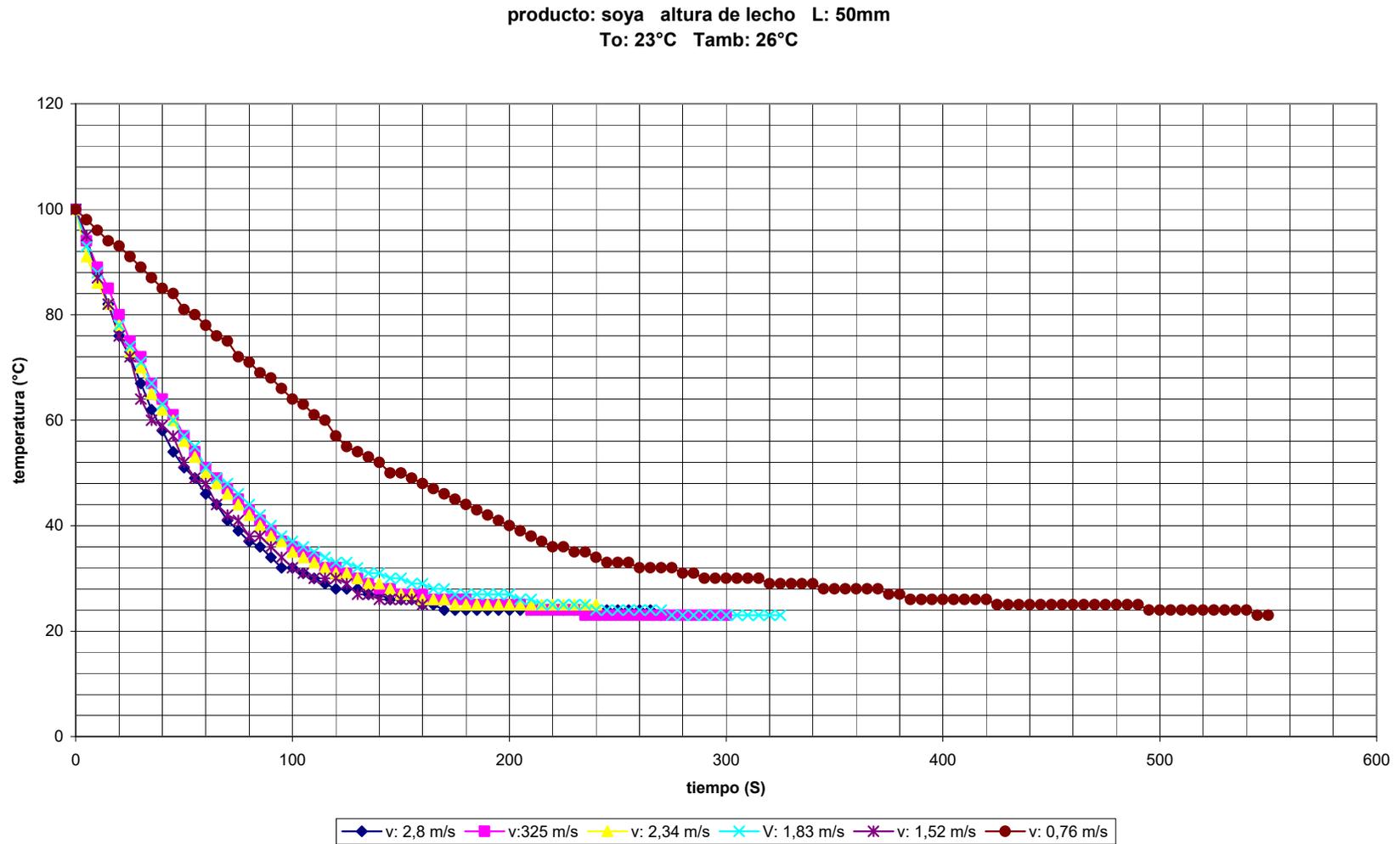


Figura 3.12 La grafica muestra los datos obtenidos de la práctica de laboratorio y muestra como para diferentes alturas del lecho empacado y la misma velocidad la temperatura es diferente

CAPÍTULO 4

4. CORRELACIONES EMPÍRICAS.

4.1. Correlaciones para el Número de Nusselt.

El cálculo de las correlaciones se realiza utilizando los datos obtenidos experimentalmente.

Los datos experimentales de la temperatura en función del tiempo, crean una grafica T vs t, de esta grafica se obtiene la pendiente que tienen una relación con los Reynolds experimentales y los números de Nusselt, en incrementos constantes de tiempo.

DATOS DE MANI (ROJO)

$21\text{ }^{\circ}\text{C} < T_{\text{amb}} < 23\text{ }^{\circ}\text{C}$ (bajo sombra)

Mes: Septiembre Región: Costa Ciudad: Duran

Serie	Velocidad del aire	Altura Lecho	tiempo
	m/s		
1	2,29	0,05	405
2	0,86	0,05	420
3	0,508	0,05	1200
4	1,72	0,1	880
5	2,43	0,1	365
6	2,33	0,1	455
7	0,81	0,1	1990
8	2,23	0,15	640
9	1,77	0,15	780
10	0,66	0,15	2790
11	1,1	0,15	1485

TABLA 14 Datos guía de las pruebas del laboratorio con maní

A continuación se muestra las tablas de Nu Vs Re generadas para las tres variables: Producto, altura del lecho y velocidad del aire que atraviesa el lecho empacado, el tiempo que se muestra, es la cantidad de tiempo experimental que se tardó el lecho empaco en llegar de 100 grados Celsius a la temperatura ambiental, además se muestra el número de serie para identificarlo en la gráfica.

Serie	Reynolds	Nusselt
1	1046,815	75,243
2	961,444	72,555
3	821,950	25,358
4	913,277	34,579
5	1113,696	83,370
6	1064,527	66,808
7	751,300	15,313
8	1023,553	47,989
9	886,506	37,533
10	749,344	10,907
11	817,840	20,492

Tabla 15.- Resultados del análisis del maní con los parámetros: altura del lecho y velocidad del aire que atraviesa el lecho.

DATOS DE MAIZ

21 °C < T_{amb} <23 °C (bajo sombra)

Mes: Septiembre Región: Costa Ciudad: Duran

DATOS MAIZ

Serie	Velocidad aire	Altura Lecho	Tiempo
	m/s	m	s
1	1,4	0,15	1980
2	2	0,15	425
3	1,8	0,15	790
4	2	0,05	655
5	1,7	0,05	905
6	2,2	0,05	230
7	2,1	0,05	570
8	1,7	0,1	875
9	1,4	0,1	2300
10	2	0,1	465
11	2,1	0,1	375

Tabla 16 Datos guía de las pruebas del laboratorio con maíz

A continuación se muestra las tablas de Nu Vs Re generadas para las tres variables: Producto, altura del lecho y velocidad del aire que atraviesa el lecho empacado, el tiempo que se muestra, es la cantidad de tiempo experimental que se tardó el lecho empacado en llegar de 100 grados Celsius a la temperatura ambiental, además se muestra el número de serie para identificarlo en la gráfica.

Serie	Reynolds	Nusselt
1	513,079	10,967
2	734,874	51,149
3	592,276	27,488
4	738,710	33,071
5	570,391	22,883
6	870,839	93,914
7	769,619	38,396
8	546,079	24,844
9	514,412	9,451
10	736,792	46,815
11	769,619	54,288

Tabla 17.- Resultados del análisis del maíz con los parámetros altura del lecho y velocidad del aire que atraviesa el lecho.

DATOS DE SOYA

21°C < T_{amb.} < 23°C (bajo sombra)

Mes: Septiembre Región: Costa

Ciudad: Duran

Serie	Velocidad del aire	Altura Lecho	Tiempo
	m/s	m	
1	2,8	0,05	270
2	2,7	0,05	300
3	2,8	0,05	240
4	2,1	0,05	325
5	3	0,05	160
6	1,9	0,05	550
7	2,33	0,1	310
8	2,2	0,1	310
9	2	0,1	470
10	1,8	0,15	340
11	1,6	0,15	370
12	1,2	0,15	3655

Tabla 18. Datos guía de las pruebas del laboratorio con soya

A continuación se muestra las tablas de Nu Vs Re generadas para las tres variables: Producto, altura del lecho y velocidad del aire que atraviesa el lecho empacado, el tiempo que se muestra, es la cantidad de tiempo experimental que se tardó el lecho empacado en llegar de 100 grados Celsius a la temperatura ambiental, además se muestra el número de serie para identificarlo en la gráfica.

serie	Reynolds	Nusselt
1	803,869	44,017
2	765,099	39,813
3	785,250	49,520
4	596,626	36,803
5	859,027	74,464
6	535,610	21,662
7	653,448	38,583
8	621,791	38,474
9	563,800	25,349
10	511,394	35,179
11	451,040	32,201
12	339,159	3,263

Tabla 19.- Análisis del soya para los parámetros altura del lecho y velocidad del aire que atraviesa el lecho.

Determinación de las Correlaciones del MANI usando los datos experimentales del equipo de laboratorio.

De la grafica:

$$y = 4,6922x - 28,39 \text{ Ecuación 4.1}$$

$$R^2 = 0,9104$$

$$\ln(Nu) = 4,69227 \ln(Re) - 28,39 \text{ Ecuación 4.2}$$

$$\ln(Nu) = 4,6922 \ln(Re) - 28,39 \ln(e) \text{ Ecuación 4.3}$$

$$\ln(Nu) = \ln(Re)^{4,6922} - \ln(e)^{28,39} \text{ Ecuación 4.4}$$

$$\ln(Nu) = \ln\left(\frac{(Re)^{4,6922}}{e^{28,39}}\right) \text{ Ecuación 4.5}$$

$$(Nu) = \left(\frac{(Re)^{4,6922}}{e^{28,39}}\right) \text{ Ecuación 4.6}$$

$$(Nu) = 2,1360 \times 10^{-12} \times \frac{(Re)^{4,6922}}{e^{28,39}} \text{ Ecuación 4.7}$$

$$Nu = 2,136 \times 10^{-12} Re^{4,6922} \text{ Ecuación 4.8}$$

La ecuación 4.8 representa la correlación entre el número de Nusselt y el número de Reynolds para las condiciones de $Pr=0,7$ y un valor de Reynolds que oscile entre los valores de:

$$635 < Re < 1362$$

Ecuación 4.9

$$R^2 = 0,9104$$

Determinación de las Correlaciones del MAIZ usando los datos experimentales del equipo del laboratorio.

De la grafica:

$$y = 3,014x - 6,9842 \text{ Ecuación 4.10}$$

Desviación de la curva:

$$\mathbf{R^2 = 0,841} \text{ Ecuación 4.11}$$

$$\ln(Nu) = 3,014\ln(Re) - 6,9842 \text{ Ecuación 4.12}$$

$$\ln(Nu) = 3,014\ln(Re) - 6,9842\ln(e) \text{ Ecuación 4.13}$$

$$\ln(Nu) = \ln(Re)^{3,014} - \ln(e)^{6,9842} \text{ Ecuación 4.14}$$

$$\ln(Nu) = \ln\left(\frac{(Re)^{3,014}}{e^{6,9842}}\right) \text{ Ecuación 4.15}$$

$$(Nu) = 9,264^{-04} \left(\frac{(Re)^{3,014}}{e^{6,9842}}\right) \text{ Ecuación 4.16}$$

$$\mathbf{Nu = 9,264 \times 10^{-04} Re^{3,014}} \text{ Ecuación 4.17}$$

La ecuación 4.17 representa la correlación entre el número de Nusselt y el número de Reynolds para las condiciones de $Pr=0,7$ y un valor de Reynolds que oscile entre los valores de:

$$450 < Re < 1100$$

Ecuación 4.18

$$R^2=0.841$$

Determinación de las Correlaciones de la SOYA usando los datos experimentales del equipo del laboratorio.

De la grafica:

$$y = 2,4117x - 12,019 \text{ Ecuación 4.19}$$

$$R^2 = 0,7129$$

De la deducción matemática.

$$\ln(Nu) = 2,41171 \ln(Re) - 12,019 \text{ Ecuación 4.20}$$

$$\ln(Nu) = 2,4117 \ln(Re) - 12,019 \ln(e) \text{ Ecuación 4.21}$$

$$\ln(Nu) = \ln(Re)^{2,4117} - \ln(e)^{12,019} \text{ Ecuación 4.22}$$

$$\ln(Nu) = \ln\left(\frac{(Re)^{2,4117}}{e^{12,019}}\right) \text{ Ecuación 4.23}$$

$$(Nu) = 6,02857 \times 10^{-06} \left(\frac{(Re)^{2,4117}}{e^{12,019}}\right) \text{ Ecuación 4.24}$$

$$Nu = 6,02857 \times 10^{-06} Re^{2,4117} \text{ Ecuación 4.25}$$

La ecuación 4.25 representa la correlación entre el número de Nusselt y el número de Reynolds para las condiciones de $Pr=0,7$ y un valor de Reynolds que oscile entre los valores de:

$$71 < Re < 837$$

Ecuación 4.26

$$R^2 = 0,7129$$

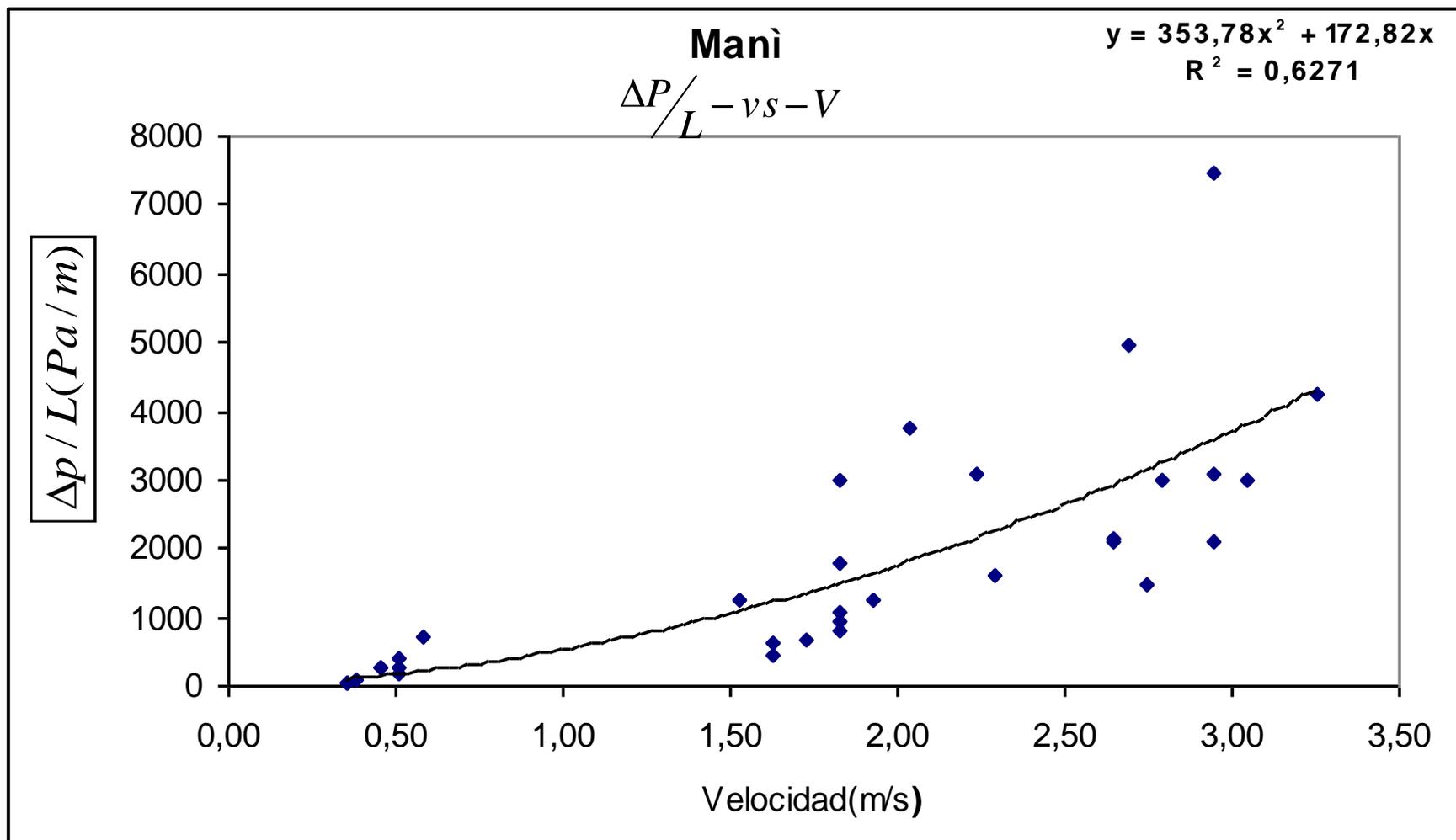
4.2. Correlaciones para la caída de presión.

Ecuaciones de la caída de presión.

Las siguientes graficas muestran la caída de presión en el lecho empacado en varias situaciones, altura de lecho, fracción de vacío y las propiedades térmicas.

De los datos obtenidos experimentalmente se realizan las graficas correspondientes a cada uno de los productos que están dentro del análisis.

La tendencia de las graficas nos determina la ecuación de relación de incremento de presión vs la velocidad del aire.



Grafica 4.1.- caída de presión vs. La velocidad del aire MANI

De la grafica de maní obtenemos:

$$\Delta P/L = 353,782V^2 - 172,82V \quad \text{Ecuación 4.27}$$

$$\text{Longitud característica} = 0,0087$$

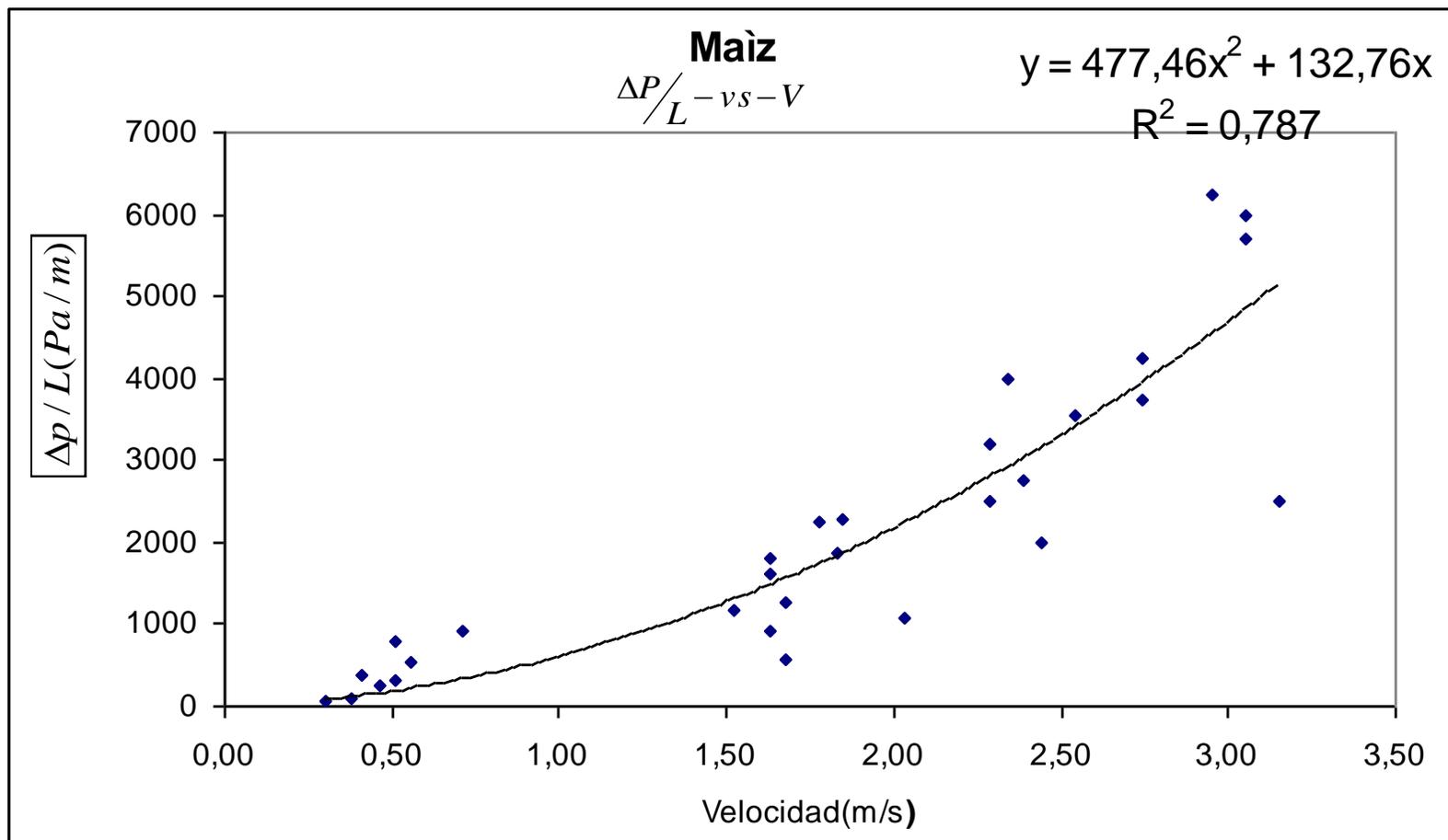
$$\text{Fracción de vacío } \varepsilon = 0,38$$

Para las condiciones y bajo las características dadas.

$$R^2 = 0,6271 \quad \text{Ecuación 4.27}$$

Desviación Estándar velocidad: 0,984

Desviación estándar de presión: 1666,879



Grafica 4.2.- caída de presión vs. La velocidad del aire MAIZ

De la grafica de maíz obtenemos:

$$\Delta P/L = 477,46^2 + 132,76V \text{ Ecuación 4.26}$$

Longitud característica (Lc) =0,006

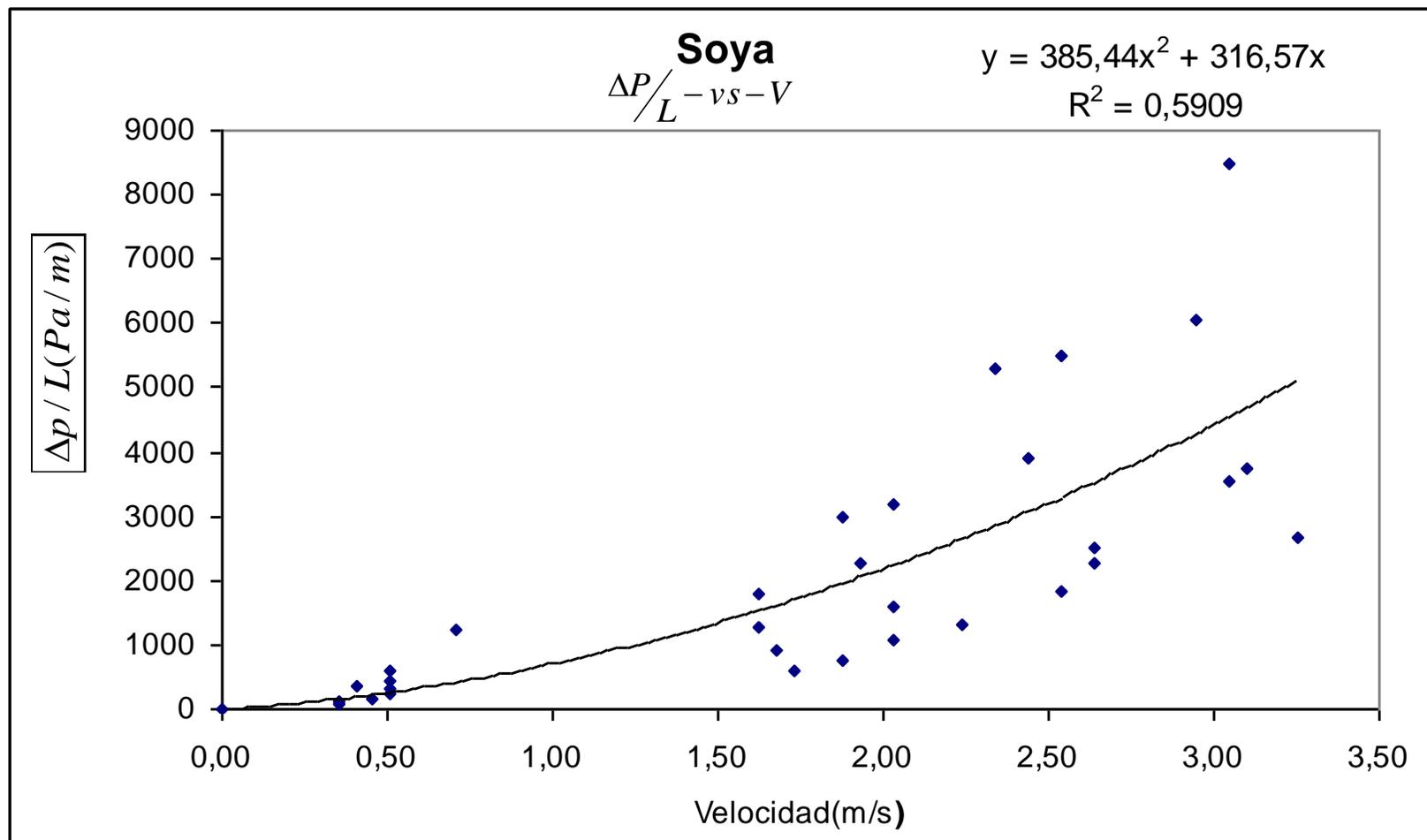
Fracción de vacío $\varepsilon=0,33$

Para las condiciones y bajo las características dadas.

$$R^2 =0,787$$

Desviación Standard velocidad: 0,91696

Desviación Standard incremento presión: 1758,679



Grafica 4.3.- Caída de la presión vs. La velocidad del aire SOYA

Soya

$$\Delta P/L = 385,44V^2 - 316,57V$$

Ecuación 4.27

Longitud característica =0,0058

Fracción de vacío $\varepsilon=0,34$

$$R2 = 0,5909$$

Para las condiciones y bajo las características dadas.

$$R2=0,59$$

Desviación estándar velocidad: 0,99665

Desviación estándar incremento presión: 2034,998

4.3. Resumen de resultados.

Resumen de resultados para el Maní

Con las condiciones de:

$$174,2 < Re < 934,48$$

Características del maní:

$$\text{Longitud característica} = 0,0087$$

$$\text{Fracción de vacío } \varepsilon = 0,38$$

Ecuación de Caída de presión:

$$\Delta P/L = 353,78V^2 + 172,82V \quad \text{Ecuación 4.28}$$

$$R^2 = 0,6271$$

Correlación de Nusselt vs Reynolds

$$Nu = 2,136 \times 10^{-12} Re^{4,6922}$$

Ecuación 4.29

Resumen de resultados para el Maíz

Con las condiciones de:

$$450 < Re < 1100$$

Características del maíz:

Longitud característica (Lc) =0,006

Fracción de vacío $\varepsilon=0,33$

Ecuación de Caída de presión

$$\Delta P/L = 477,46^2 + 132,76V$$

Ecuación 4.30

Correlación de Nusselt vs Reynolds

$$Nu = 9,264 \times 10^{-04} Re^{3,014}$$

Ecuación 4.31

Resumen de resultados de la Soya

Con las condiciones de:

$$71 < Re < 837$$

Características de la soya:

Longitud característica =0,0058

Fracción de vacío $\varepsilon=0,34$

Ecuación de Caída de presión

$$\Delta P/L = 385,44V^2 + 316,57V$$

Ecuación 4.32

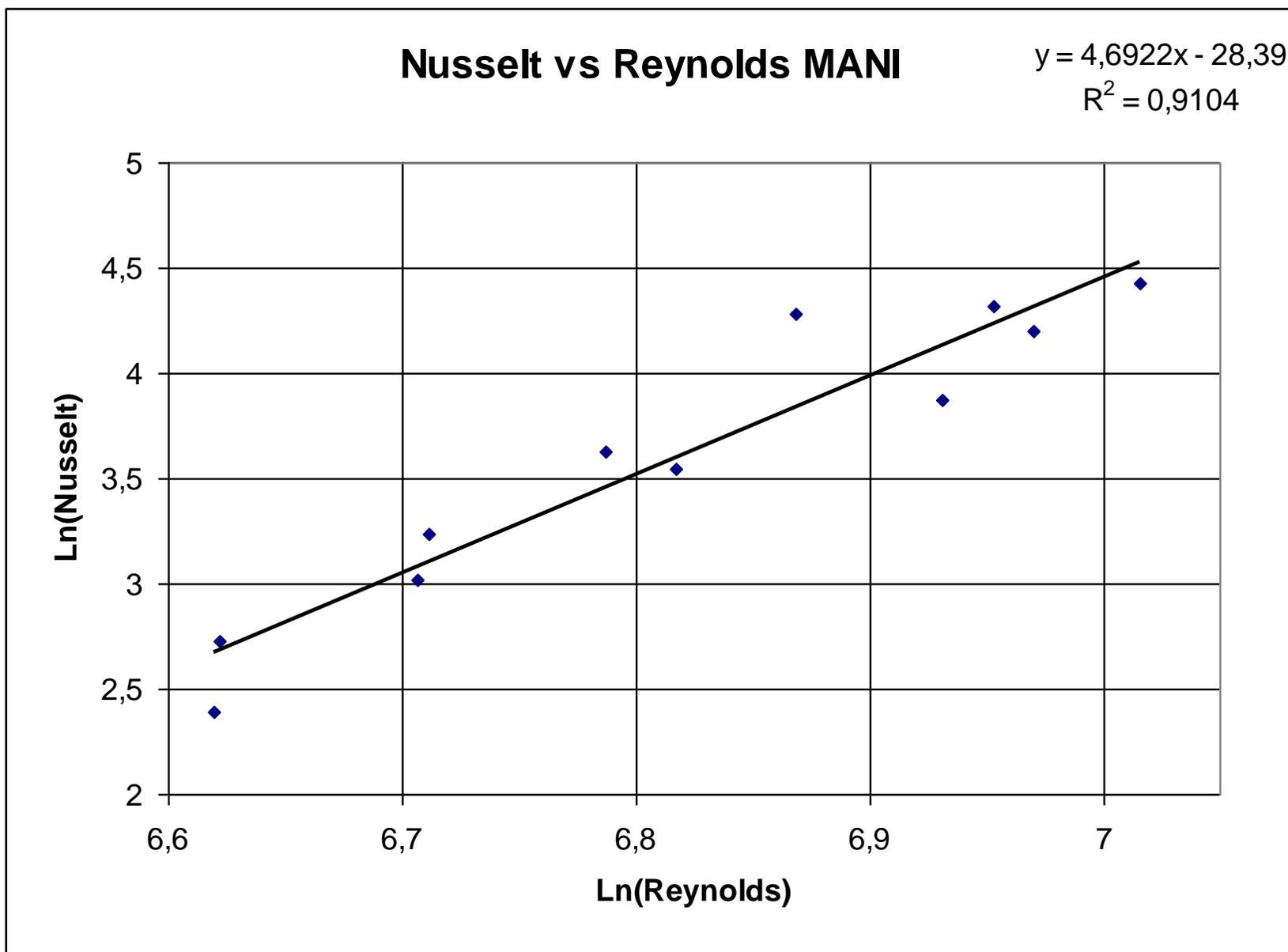
$$R^2=0,59$$

Correlación de Nusselt vs. Reynolds

$$Nu = 6,02857 \times 10^{-06} Re^{2,4117}$$

Ecuación 4.33

4.4. Análisis de resultados.



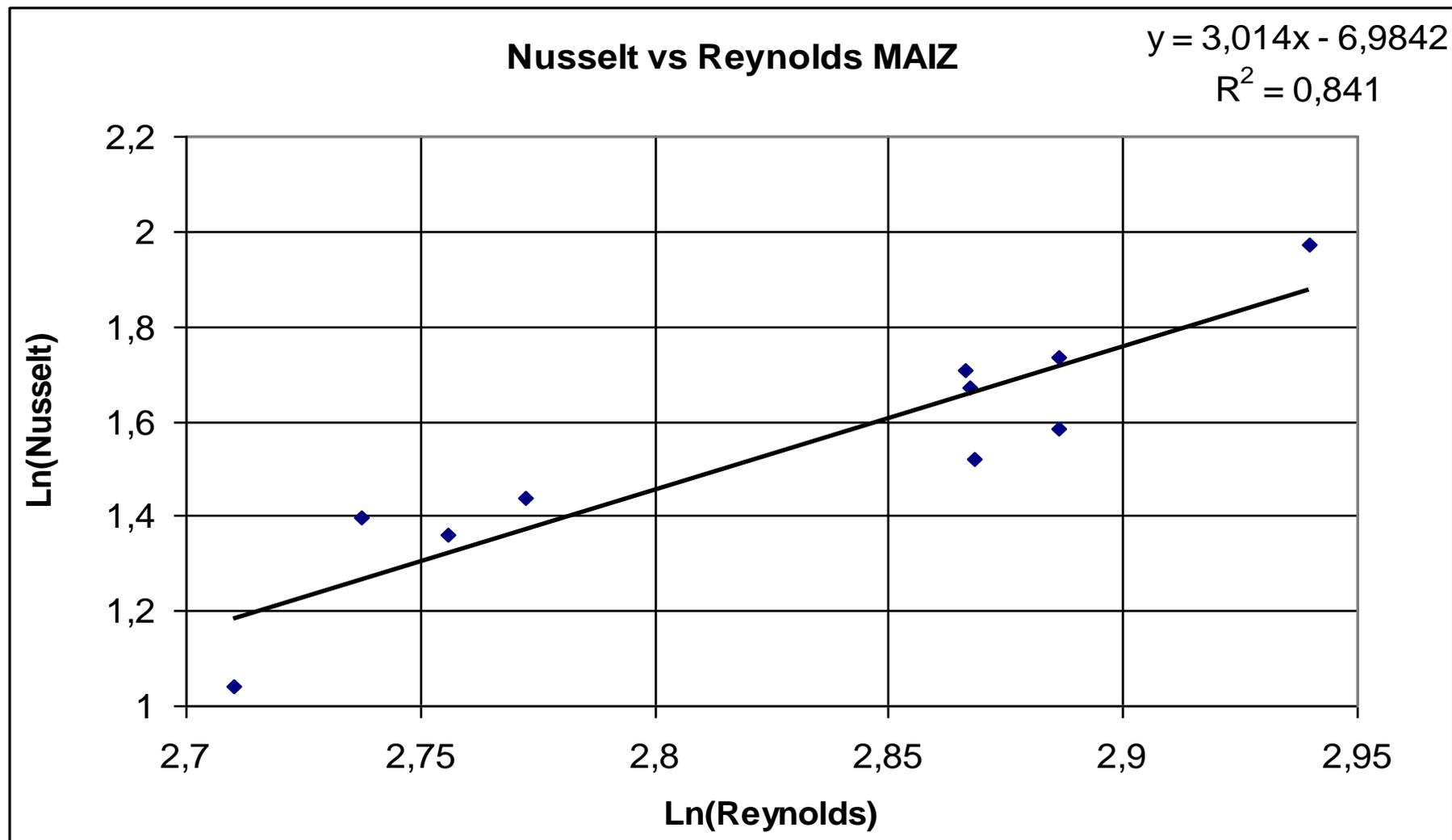
Grafica 4.4.-Relación de nusselt vs Reynolds para maní

Las curvas de nusselt vs. Reynolds, para cada prueba tienen la tendencia a convertirse en constante, cuando se acerca a la temperatura ambiente; en este caso, aunque se aumente la velocidad del aire el reynolds varía poco en relación al cambio del nusselt.

El análisis, se realiza en los instantes en que la relación, tiene una variación, lineal y no constante.

Desviación Standard: El Reynolds: 128,703853

Desviación Standard: Nusselt: **26,120808**



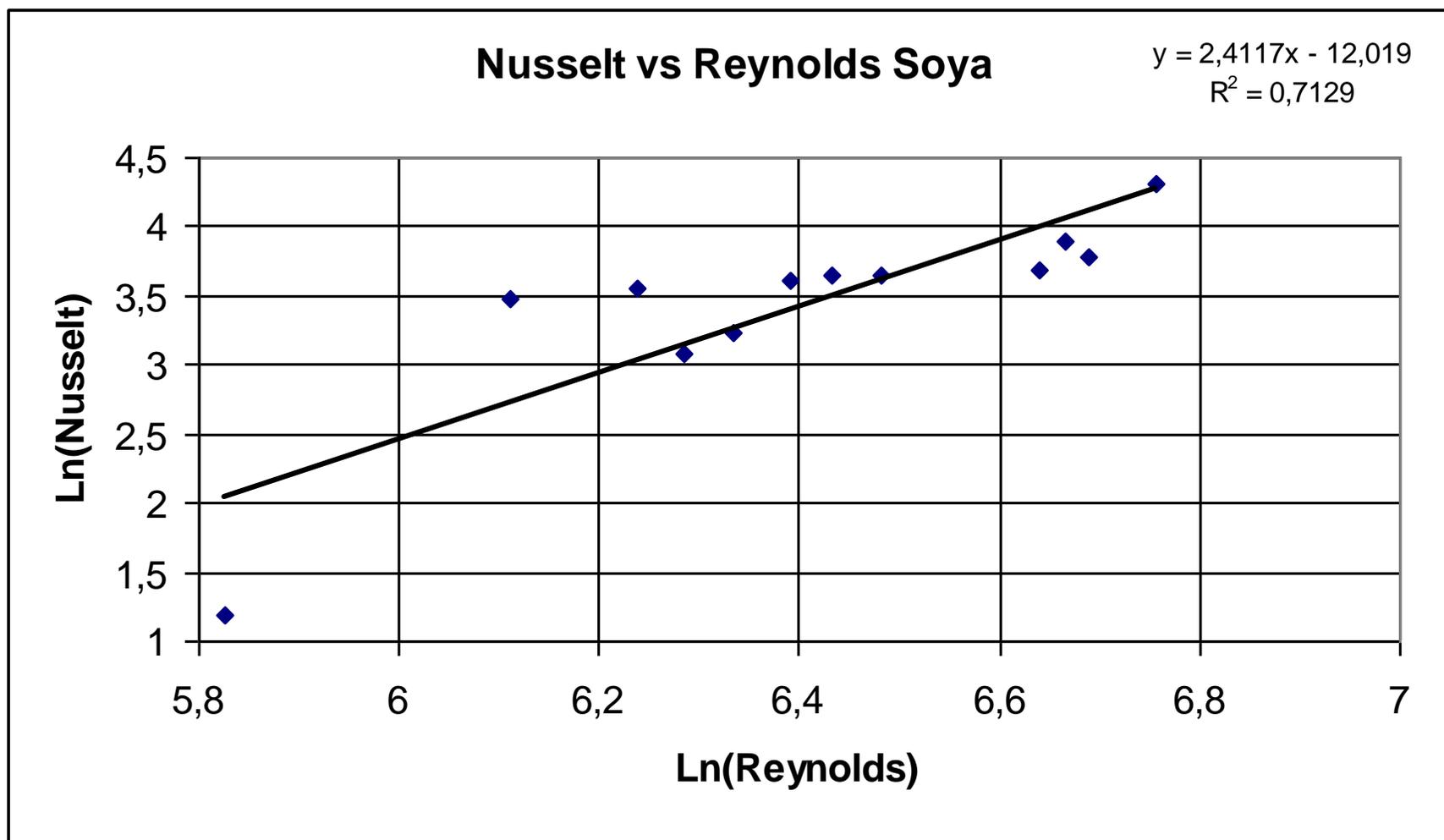
Grafica 4.5.- Nusselt vs Reynolds para el maíz para las diferentes alturas y velocidades del aire.

Las curvas de nusselt vs. Reynolds, para cada prueba tienen la tendencia a convertirse en constante, cuando se acerca a la temperatura ambiente; en este caso, aunque se aumente la velocidad del aire el reynolds varía poco en relación al cambio del nusselt.

El análisis, se realiza en los instantes en que la relación, tiene una variación, lineal y no constante.

Desviación Standard: El reynolds: 123,979914

Desviación Standard: Nusselt: 23,9219664



Grafica 4.6.- Nusselt vs Reynolds para el soya para las diferentes alturas y velocidades del aire.

La grafica muestra la relación, que existe el nusselt y el reynolds, produce una curva con las características, que incluye cambios en el la altura del lecho, velocidad y característica del grano.

Las curvas de nusselt vs. Reynolds, para cada prueba tienen la tendencia a convertirse en constante, cuando se acerca a la temperatura ambiente; en este caso, aunque se aumente la velocidad del aire el reynolds varía poco en relación al cambio del nusselt.

El análisis, se realiza en los instantes en que la relación, tiene una variación, lineal y no constante.

Desviación Standard reynolds: 156,753574

Desviación Standard nusselt: 16,9379503

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

CONCLUSIONES

- Las mediciones experimentales de temperatura del fluido en la entrada y en la salida de la área de pruebas presentaron valores físicamente congruentes, ya que en todo instante de tiempo se registraron valores de temperatura mayores en la salida, evidenciando la transferencia de energía térmica del lecho poroso (sólido).
- Se evidenció la no existencia del equilibrio térmico entre los sólidos del lecho empacado y el aire.
- Se ha demostrado que el número de Nusselt y, por ende, el coeficiente de transferencia de calor en el flujo de fluidos a través de los lechos empacados, depende tanto del número de Reynolds como de la fracción de vacío.

- Se propuso tres correlaciones para determinar el número de Nusselt, una para cada valor de producto estudiado. Cada una de éstas depende del número de Reynolds, obedeciendo a una ley de la potencia se concluyó que ninguna se generalizaba para todos los productos y para diferentes condiciones.

La determinación experimental del coeficiente de transferencia de calor permitió ajustar las ecuaciones necesarias para su cálculo teórico.

- Los datos simulados se ajustaron a los experimentales con error relativo porcentual de la desviación de 20 %, valor que se considera aceptable para este caso ya que es muy difícil mantener un flujo de aire uniforme a través de las partículas. Asimismo el modelo propuesto ha demostrado ser una herramienta útil a la hora de analizar y optimizar el comportamiento de este tipo lecho.
- Se recomienda realizar las pruebas en laboratorios con el ambiente controlado, para reducir los errores por los efectos de la humedad en las diferentes horas del día y las temporadas anuales.
- Se recomienda que el contenedor debe ser adiabático y evitar pérdidas de calor por contacto con el instrumento de medición.

- Se recomienda utilizar velocidades del aire por arriba del 2% de la velocidad crítica por la sensibilidad del equipo.
- Se recomienda mantener dos termómetros fijos en el sistema, uno a la entrada y el otro a la salida para los diferentes instantes de tiempo.
- Se recomienda utilizar la gama de velocidades de flujo de aire utilizadas en esta tesis

BIBLIOGRAFÍA.

1. Avallone, Eugene A. "Manual de Ingeniero Mecánico". Tomo 1 y 2. Novena Edición. Mc Graw Hill. Mexico, 1996.
2. Bolinaga, Juan. "Mecánica elemental de los fluidos". Fundación Polar. "Universidad Católica Andrés". Caracas, 1992.
3. Enciclopedia Salvat, Ciencia y Tecnología. Tomo 12 y 14. Salvat Editores, S.A. Primera Edición. Barcelona, 1964.
4. Mott, Robert. "Mecánica de los Fluidos". Cuarta Edición. Prentice Hall. México, 1996.
5. Vargas, Juan Carlos. "Manual de Mecánica para no Mecánicos". Intermedios Editores. Colombia, 1999.
6. Barbosa-Cánovas. Operaciones Unitarias en la Ingeniería de Alimentos. 1999.
7. Foust, Wenzel, Clump, Maus, Andersen. Principios de Operaciones Unitarias. Editorial CECSA. México. 1998.
8. Gamane, Lannoy. Estimate Fixed-bed pressure drop. Chemical Engineering. 1996.

9. Bifani, V.; Etchberrigaray, M.; Moyano, P. Y Osorio, F. (1995).
Diseño de un Intercambiador de Calor Tubular para el
Tratamiento de Pulpa de Vegetales. Alimentos 20 (3-4): 41-
50
10. Heldman, D. y Singh, R. (1981). Food Process Engineering,
segunda edición, Avi Publishing
11. Avallone, Eugene A. "Manual de Ingeniero Mecánico". Tomo
1 y 2. Novena Edición. Mc Graw Hill. Mexico, 1996.
Bolinaga, Juan. "Mecánica elemental de los fluidos".
Fundación Polar. "Universidad Católica Andrés". Caracas,
1992.
12. Barbosa-Cánovas. Operaciones Unitarias en la Ingeniería de
Alimentos. 1999.
13. Foust, Wenzel, Clump, Maus, Andersen. Principios de
Operaciones Unitarias. Editorial CECSA. México. 1998.
14. Gamane, Lannoy. Estimate Fixed-bed pressure drop.
Chemical Engineering. 1996.
15. Frank P. Incropera, David P. DeWitt Fundamentos de
transferencia de Calor.