Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América
Facultad de Química e Ingeniería Química
Escuela Académico Profesional de Ingeniería Química

Estudio experimental sobre la caída de presión y secado de cereales en lecho surtidor convencional

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Químico

AUTOR

Fanny BLAS RODRÍGUEZ

ASESOR

Cesario CONDORHUAMÁN CCORIMANYA

Lima, Perú

2004



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Blas, F. (2004). *Estudio experimental sobre la caída de presión y secado de cereales en lecho surtidor convencional*. Tesis para optar el título de Ingeniero Químico. Escuela Académico Profesional de Ingeniería Química, Facultad de Química e Ingeniería Química, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.

Mi mayor reconocimiento a los miembros del Jurado Examinador:

Presidente: Mg.Julio Javier Armijo Carranza

Miembro: Ing.Gilberto Salas Colotta

Asesor: Mg.Cesario Condorhuamán CCorimanya

Mi agradecimiento especial a mi asesor Mg. Cesario Condorhuamán CCorimanya, jefe del Departamento Académico de Operaciones Unitarias, por las facilidades brindadas y por su constante orientación que hicieron posible el desarrollo de la presente tesis.

A mis padres,mi más profundo agradecimiento por su apoyo continuo e incondicional.

TABLA DE CONTENIDOS

	Pág.
1.0. Resumen	1
2.0. Introducción	2
3.0. Fundamento Teórico	4
3.1 Tiempo de almacenaje seguro para granos	5
3.2 Curvas de velocidad de Secado	5
3.3 Periodo de secado a velocidad constante	6
3.4 Periodo de secado a velocidad decreciente	8
3.5 Lechos fijos	10
3.6 Lechos Fluidizados	10
3.7 Caída de presión	12
3.8 Factor de forma	12
3.9 Secado en lecho surtidor	13
4.0. Detalles Experimentales y presentación de Datos	16
4.1 Equipo experimental, instrumentos accesorios y materiales	16
4.2 Metodología del Trabajo Experimental	18
4.3 Diagrama del Equipo experimental	19
5.0. Tabla de Datos Experimentales y Resultados	21
6.0. Métodos de cálculo	39
7.0. Análisis y Discusión de Resultados	44
8.0. Conclusiones	46
9.0. Recomendaciones	47
10.0.Nomenclatura de términos utilizados	48
11.0. Referencias Bibliográficas	50
12.0. Anexos	53
12.1 Apéndice I Gráficas de la curva de secado	54
12.2 Apéndice II Esquema de los instrumentos utilizados en el laboratorio	61
12.3 Apéndice III Gráfica de Esfericidad vs Porosidad	67

FIGURAS

Pág.

Figura N°1 Curva típica de secado para condiciones constantes,contenido de humedad como una función del tiempo. 8

Figura N°2 Curva de la velocidad de secado,como una función del contenido de humedad. 9

Figura N°3 Caída de presión en función a la velocidad, para lechos fijos y fluidizados 11

Figura N°4 Perfil de Distribución de los granos durante la Operación en Lecho surtidor 14

Figura N°5 Diagrama del Equipo experimental 19

Figura N°6 Equipo de secado en lecho surtidor 20

Figura N°7 Equipo Detector de Humedad Analógico 61

Figura N°8 Balanza de Precisión 61

Figura N°9 Bomba Reductora y Tolva de Alimentación 62

Figura N°10 Regulador de Presión de Aire 62

Figura N°11 Equipo con Formación de Lecho Surtidor para determinar la Caída de Presión 63

Figura N°12 Aparatos de Medición para Determinar la Caída de Presión(manómetro en U y rotámetro) 63

Figura N°13 Equipo de Secado en lecho surtidor 64

Figura N°14 Intercambiador de Calor 65

Figura N°15 Compresora 66

Figura N°16 Caldero 66

TABLAS

Pág.

Tabla N°1 Condiciones de Laboratorio 21
Tabla N°2 Dimensiones del Equipo experimental 21
Tabla N°3 Propiedades Fisicoquímicas de la Partícula 21
Tabla N°4 Propiedades Físicas del fluído 21
Tabla N°5 Características de los granos utilizados 22
Tabla N°6 Rango de los Parámetros de Operación 22
Tabla N°7 Tabla de las caídas de presión calculadas y experimentales en función a la altura del lecho 23
Tabla N°8 Tabla de la caída de presión en función al Diámetro de la partícula y factor de forma 23
Tabla N°9 Curva de calibración del Rotámetro 24
Tabla N°10 Caída de presión de la lenteja a una altura de lecho de 0.10 m 25
Tabla N°11 Caída de presión de la lenteja a una altura de lecho de 0.15 m 26
Tabla N°12 Caída de presión de la lenteja a una altura de lecho de 0.20 m 27
Tabla N°13 Caída de presión del trigo a una altura de lecho de 0.10 m 28
Tabla N°14 Caída de presión del trigo a una altura de lecho de 0.15 m 29
Tabla N°15 Caída de presión del trigo a una altura de lecho de 0.20 m 30
Tabla N°16 Caída de presión de la cebada a una altura de lecho de 0.10 m 31
Tabla N°17 Caída de presión de la cebada a una altura de lecho de 0.15 m 32

Tabla N°18 Caída de presión de la cebada a una altura de lecho de 0.20 m 33

Tabla N°19 Cuadro de porcentajes de humedad,temperatura de entrada y salida del fluído en función del tiempo de secado para el trigo 34

Tabla N°20 Cuadro de porcentajes de humedad,temperatura de entrada y salida del fluído en función del tiempo de secado para la cebada 35

Tabla N°21 Cuadro de porcentajes de humedad,temperatura de entrada y salida del fluído en función del tiempo de secado para el arroz 36

Tabla N°22 Cuadro de porcentajes de humedad,temperatura de entrada y salida del fluído en función del tiempo de secado para la avena 37

GRAFICAS

Pág.

Gráfica N°1 Curva de Calibración-Corridas en Vacío 54

Gráfica N°2 Caída de Presión vs Caudal para el trigo y cebada a una misma altura de lecho (0.10m) 55

Gráfica N°3 Caída de Presión vs Caudal para la cebada y la lenteja a una misma altura de lecho (0.10m) 56

Gráfica N°4 Curva de Secado para el trigo 57

Gráfica N°5 Curva de Secado para la cebada 58

Gráfica N°6 Curva de Secado para el arroz 59

Gráfica N°7 Curva de Secado para la avena 60

Gráfica N°8 Gráfica de Esfericidad vs Porosidad 67

RESUMEN

Se ha obtenido datos experimentales de la caída de presión y el secado de granos de cereal haciendo uso de una columna de lecho surtidor convencional,los cereales empleados son:trigo,cebada,arroz,avena y lenteja.

El rango de variación de los porcentajes de humedad de los granos en el secado,oscilan entre 15.0 y 21%,los diámetros de las partículas varían de 0.003 a 0.0049 m.

La mínima velocidad para producir el efecto surtidor (spouting)canalización,se encuentra entre 2.64 a 3.40 m/s.

El rango de variación de la caída de presión para los granos de lenteja,trigo y cebada,se encuentran entre 52 a 169(kg/m^2) a diferentes alturas de lecho.

Los coeficientes de transferencia de masa varían desde $4.0x10^3$ a $5.5x10^3$ (kg/hm^2).

INTRODUCCIÓN

En la actualidad existen diferentes formas de secado, en el presente trabajo de investigación se emplea la técnica (de secado en lecho surtidor convencional debido a que esta técnica produce una humedad homogénea entre los granos a diferencia de otros métodos de secado.
La técnica del lecho surtidor es recomendado para secar granos de diámetros mayores de 1mm,a comparación del lecho fluidizado,debido a que en el lecho fluidizado se requerirá altas velocidades de secado y cuyo costo sería demasiado caro.
El lecho surtidor tiene un bajo costo de inversión y reduce el espacio de instalación,debido a esto es importante obtener una base de datos experimentales que permitan diseñar equipos de secado a nivel industrial.

El mecanismo de secado consiste, en que el calor sensible que recibe el sólido, origina un calentamiento del mismo, que a su vez calienta al líquido que acoge, con lo que este aumenta su presión de vapor y la masa del líquido pasará a formar parte de la corriente fluída por evaporación.El líquido en la superficie será transferida en primer lugar,luego el que está alojado en el interior fluirá hacia el exterior por capilaridad a traves de los poros**[20]**.
Los lechos en surtidor eliminan el problema del gradiente de humedad, dado el constante movimiento de renovación de las partículas a lo largo del lecho.El incremento de la gradiente de la temperatura permite que el tiempo de residencia sea favorable para que la temperatura de los granos no deterioren sus nutrientes.

En los años 40,Birchard,Standfield y Cashmore realizaron una serie de investigaciones sobre el secado en lecho fijo tales como las que se indican a continuación:

Birchard [2] hizo un estudio del efecto de la temperatura del aire y el tiempo de secado para granos de trigo,si se secan los granos a temperaturas mayores de 110°C se causará una disminución de las proteínas en el contenido del grano.

STANSFIELD Y COOK [1] después de un estudio integral del secado de trigo lograron las siguientes conclusiones:

a) La máxima temperatura del aire caliente es de 104.4 °C
b) El máximo periodo de secado es de 10 minutos por cada 1 % de humedad removida sobre el rango del 19 al 14%.

CASHMORE [3] establece que la temperatura crítica del aire caliente es gobernada por el contenido de humedad, lo cual no debe ser excedido.A partir de los años 60,se comienza a utilizar la técnica del lecho surtidor para el secado de diversos granos, ya que mediante esta técnica se reducen los costos y el secado se realiza hasta la humedad crítica de los granos,en la cual se asegura que los granos no sufrirán daños de ataque microbiano,germinación.

Los objetivos del presente trabajo de investigación son:

a).- Mostrar el efecto de la caída de presión en función al diámetro,esfericidad, porosidad de la partícula,para los granos de trigo,cebada y lenteja.

b).- Estimar la velocidad mínima que se necesita para producir el surtidor en el lecho y predecir los coeficientes de transferencia de masa.

c).-Obtener una curva de secado experimental que muestre la variación del porcentaje de humedad frente al tiempo de secado,para los granos de trigo,cebada,arroz y avena.

FUNDAMENTO TEORICO

El secado consiste en retirar por evaporación el agua de la superficie del producto y traspasarla al aire circundante, la rapidez de este proceso depende del aire y de las características del producto (composición,contenido de humedad,tamaño de partícula,etc).El aire contiene y puede absorber vapor de agua,la cantidad de vapor de agua presente en el aire se llama humedad**[3]**.Un aire absolutamente seco sin vapor de agua en su interior contiene una humedad relativa de cero porciento,mientras que uno saturado de agua tiene una humedad relativa de cien porciento.La cantidad de vapor de agua que el aire puede absorber depende en gran medida de su temperatura,a medida que el aire se calienta su humedad relativa decae y por tanto puede absorber mas humedad.Al calentarse el aire alrededor del producto este se deshidrata mas rápidamente,a mayor temperatura el aire tiene mayor capacidad de absorber agua;cuanto mayor es el flujo de aire más rápidamente se eliminará el agua del producto que se está secando.Las características del producto tales como naturaleza y tamaño de las partículas influyen en el nivel de secado. Luego que la humedad de la superficie de un producto se ha retirado por evaporación,el nivel de secado depende de la velocidad con la que su humedad interna se dirige a la superficie,esta varía de un producto a otro.El tamaño de partícula es un factor a tomar en cuenta,mientras mas pequeña sea la pieza de alimento que se va a deshidratar,menor será la distancia que debe recorrer la humedad interna para llegar a la superficie**[1]**.

Para obtener un producto seco de mejor calidad se debe alcanzar el equilibrio entre un nivel máximo de secado que permita obtener eficiencia económica, calidad microbiológica y un mínimo de pérdida de componentes escenciales en el alimento**[7]**.

El almacenamiento de granos de cereal u otro tipo de semillas se ve a menudo con la dificultad de que debido al alto contenido de humedad,se produce la germinación natural de ellas,lo cual imposibilita su mercadeo y consumo**[5]**.Es necesario entonces extraerles la humedad adquirida por temprana cosecha,lluvias o por la naturaleza misma del grano.

Tiempo de almacenaje seguro para granos:

La humedad está en dependencia directa con la temperatura, a menor temperatura una masa de granos con igual porcentaje de humedad,se conserva sin sufrir daños durante más tiempo.

Para independizarse de estas condicionantes del almacenaje, se procede al secado**[8]**.Se debe recordar que todos los granos son materiales higroscópicos,es decir están intercambiando humedad en forma permanente con el aire que los rodea, este intercambio ocurre hasta que se alcance una condición de equilibrio en la que el grano no toma ni pierde humedad**[9]**.

Curvas de velocidad de secado:

Los datos experimentales que se obtienen durante el secado de un sólido por una corriente de aire,son el contenido de humedad y el tiempo en condiciones constantes de secado.

Esto significa que la temperatura,velocidad,humedad y presión del aire se mantienen constantes y que las condiciones de salida del aire son sustancialmente las mismas que las de la entrada,la diferenciación de los resultados bien gráfica o numéricamente dan el valor de la velocidad de secado,que puede construirse gráficamente en función del contenido de humedad o bien en función del tiempo de secado.La curva de velocidad de secado puede dividirse en un periodo de velocidad constante y un periodo de disminución de la velocidad,si el contenido de humedad

que se desea obtener es mayor que el contenido crítico de humedad,únicamente se presentará el periodo de velocidad constante.

Al secar un sólido húmedo mediante un gas con temperatura y humedad fijas,aparece siempre un patrón general de comportamiento.Inmediatamente después del comportamiento de la muestra y el medio secante.La temperatura del sólidos se ajusta hasta que alcanza un estado estable.En el estado estable,una medida de temperatura mostrará que la temperatura de la superficie húmeda del sólido es la temperatura del bulbo húmedo del medio secante.

Periodo de secado a velocidad constante.-Las temperaturas dentro del sólido que se seca tenderán a igualar la temperatura del bulbo húmedo del gas, pero ahí,el acuerdo será imperfecto debido al movimiento de la masa y del calor.Una vez que estas temperaturas de la carga alcanzan la temperaturas bulbo húmedo del gas,se encuentran que son bastantes estables, y que la proporción de secado permanece también constante.Este es el llamado periodo de secado a velocidad constante.

El periodo termina cuando el sólido alcanza el contenido crítico de humedad.

Para este periodo,la velocidad de secado en términos de transferencia de masa se expresa por la siguiente ecuación**[27]:**

$$\frac{dw}{dt} = K_y A\left(H_w - H_g\right) \qquad (1)$$

Dado que el calor es transferido a la superficie húmeda a la misma velocidad de evaporación del agua,la velocidad de secado también puede expresarse en términos de transferencia de calor por la siguiente ecuación:

$$\frac{dw}{dt} = \frac{h_c A(t_{bs} - t_{bh})}{\lambda_0} \qquad (2)$$

Igualando las ecuaciones (1) y (2) se tiene el balance entre la transferencia de masa por evaporación y la transferencia de calor por convección:

$$\frac{dw}{Adt} = K_y(H_w - H_g) = \frac{h_c(t_{bs} - t_{bh})}{\lambda_0} \qquad (3)$$

En la cual $\frac{dw}{Adt}$ es la velocidad de secado por unidad de área,

La ecuación (14)puede modificarse por medio de la relación empírica para las mezclas de aire y vapor de agua $\frac{h_c}{k_y} \cong C_p$,

donde C_p es el calor específico del aire húmedo en $\frac{Kcal}{Kg_{aire}°C}$

La ecuación (11) se convierte en:

$$(H_w - H_g) = \frac{C_p(t_{bs} - t_{bh})}{\lambda} \qquad (4)$$

y $$C_p = 0.21 + 0.46(H_{abs}) \qquad (5)$$

Reemplazando datos entonces se tiene:

$$K_y = \left(\frac{dw}{Adt}\right)\frac{1}{(H_w - H_g)} \qquad (6)$$

La operación de secado continúa con velocidad constante hasta alcanzar el contenido de humedad crítico,en que se inicia el periodo de velocidad decreciente.

Periodo de velocidad decreciente.-Más allá del contenido crítico de humedad la temperatura de la superficie aumenta, y la velocidad de secado disminuye rápidamente.
El periodo de velocidad decreciente puede tomar un tiempo bastante mas largo que el periodo de velocidad constante,aún cuando el retiro de humedad pueda ser bastante menor.
La velocidad de secado se aproxima a 0 para un cierto contenido de humedad en equilibrio,el cual, es el contenido más bajo de humedad que se puede obtener en el sólido bajo las condiciones de secado que se empleen.

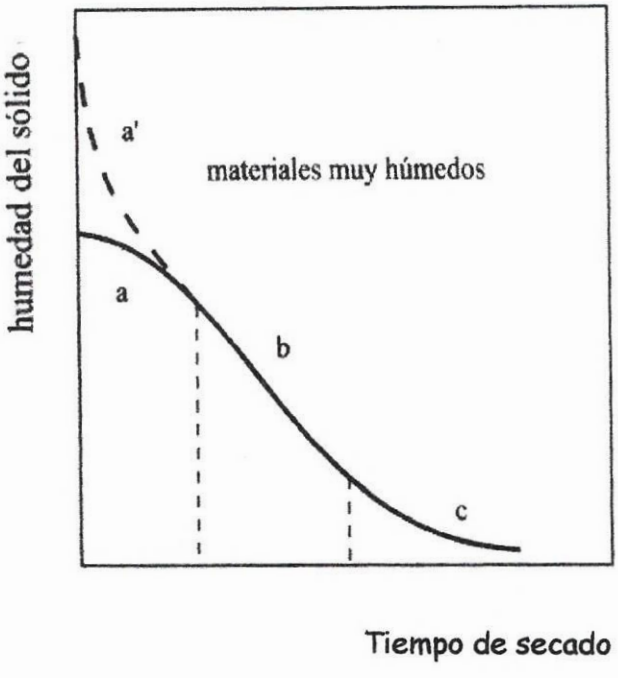


Figura 1:Curva típica de secado para condiciones constantes,contenido de humedad como una función del tiempo

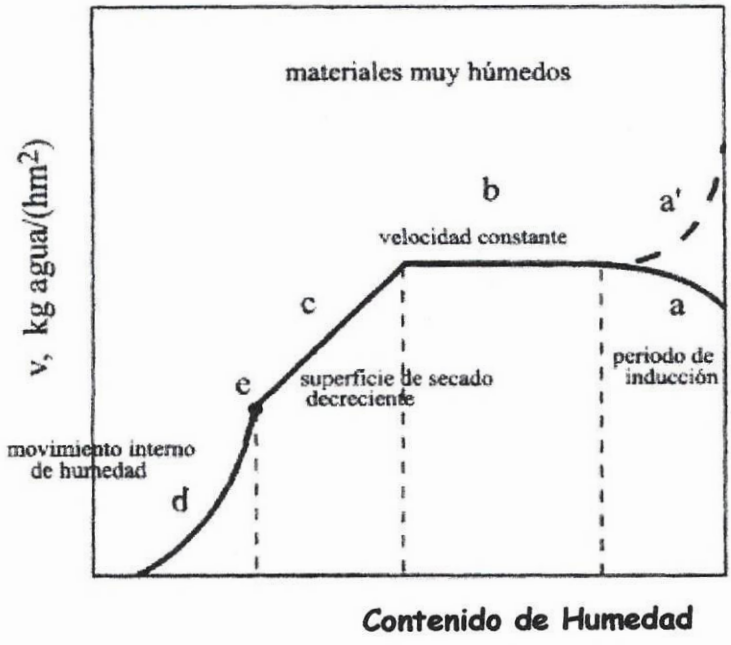


Figura2: Curva de la velocidad de secado,como una función del contenido de humedad

Las Figuras 1 y 2, muestran curvas típicas de secado, una trazada sobre la base de contenido de humedad contra el tiempo y la otra sobre la base de velocidad de secado contra el contenido de humedad.La primera gráfica,es la forma en la cual se obtienen generalmente los datos experimentales para el secado. La figura 2 muestra una descripción mucho más detallada del proceso de secado.

Estas curvas típicas para el secado, están relacionadas con el mecanismo que tiene lugar en el proceso. El proceso de secado representado por el segmento a, de las curvas de las Figuras 1 y 2 representan el periodo en el estado inestable,durante el cual la temperatura del sólido alcanza el valor correspondiente al estado estable.

Durante el periodo de velocidad constante,segmento b de las curvas de secado 1 y 2,la superficie total expuesta esta

saturada con agua.Durante el periodo de secado entre el punto C es llamado primer periodo de velocidad decreciente. Para contenidos de humedad inferiores al punto D, en la que la evaporación tiene lugar procedente del interior del sólido,el contenido de humedad en equilibrio se alcanza cuando la presión de vapor sobre el sólido iguala a la presión de vapor parcial en el gas secante que llega.
Este periodo es el llamado "segundo periodo de velocidad decreciente".

Lechos Empacados

Lecho fijo.-En el lecho fijo,el gas a baja velocidad causa una relativa caída de presión,las partículas sólidas son esencialmente inmóviles y el gas se desplaza a través de los espacios vacíos en el lecho;un posterior incremento del flujo del gas causa una ligera expansión del lecho y las partículas ganan cierta libertad de movimiento.

Lecho Fluidizado.- y las partículas están suspendidas en la corriente fluída con un movimiento desordenado y libre en todas las direcciones,se dice que el sólido está en el estado fluidizado y el sistema gas-sólido tiene características de líquido,el lecho presenta una superficie diferente a manera de un líquido hirviente por las pequeñas burbujas del gas fluidizante.

Cuando el fluído alcanza cierta velocidad, se establece un movimiento interno de las partículas en el lecho y la fluidización comienza.El lecho experimenta una mayor expansión con un incremento adicional en el flujo del fluído y el movimiento de las partículas se intensifica.

En esta etapa,un aumento del flujo de aire causará una mayor agitación y una considerable fluctuación en la parte superior del lecho.

Una desigual distribución del flujo del fluído a través de la sección transversal de un lecho fijo o fluidizado puede causar el efecto llamado ***canalización***.Este fenómeno disminuye el área interfacial.Si el canal es lo suficientemente largo como para formar un conducto, la caída de presión será menor que la predicha por el peso del lecho, aunque la fluidización ocurra.

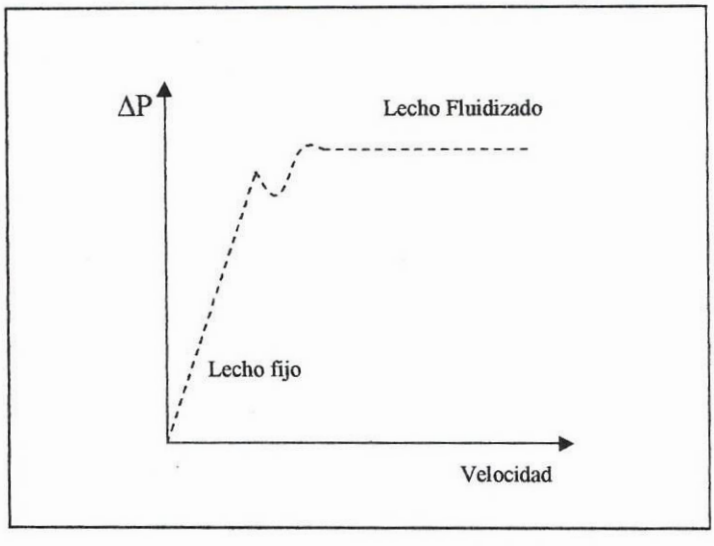


Figura 3: Caída de presión Vs Velocidad en lechos fijos y fluidizados

CAIDA DE PRESION

Parent,Yagol y Steiner**[10]**reportaron que la caída de presión en fluidización es aproximadamente igual al peso del lecho por unidad de área.Madonna y Lama **[9]** obtuvieron una correlación para estimar la caída de presión del lecho surtidor para un flujo de aire,usando como base la ecuación de Leva**[5]** y partiendo de la ecuación para lechos fijos,R.F.Lama**[8]**evaluó experimentalmente las constantes de esta ecuación y encontró que la máxima caída de presión para lechos en surtidor se determina haciendo uso de la siguiente ecuación :

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{1120 G \mu \lambda^2 (1-\varepsilon)^2}{D_p^{\,2} \rho_f g \varepsilon^3} \qquad (7)$$

Factor de Forma.-Carman introdujo el concepto de factor de forma (λ), su importancia en el entendimiento del fenómeno de flujo de fluídos a través de lechos porosos ha sido resaltado por diversos autores.

Max Leva **[5]** derivó una ecuación en la cual el factor de forma(λ),está directamente relacionado al diámetro de la partícula al ser comparada con la esfericidad(ψ) de Brownell,se obtiene la siguiente relación:

$$\Psi = (1/\lambda) \qquad (8)$$

SECADO EN LECHO SURTIDOR

La técnica de lechos en surtidor fue desarrollada para el contacto de un gas con partículas irregulares que no son suceptibles de fluidización, a diferencia de los lechos fijos el contacto sólido-gas reviste características propias y hay un movimiento típico del sólido.

K.B. Mathur y P.E. Gishler **[6]** realizaron un exhaustivo estudio de las variables que intervienen en este proceso y obtuvieron una relación empírica para la velocidad mínima del fluído necesaria para producir el chorro o surtidor para un sistema determinado en base al diámetro de la columna, diámetro del orificio de entrada, espesor del lecho y características del fluído y partículas.Posteriormente otros investigadores**[11,5]**; hicieron un análisis de la anterior relación en base a consideraciones teóricas y evaluaron relaciones para el cálculo de la caída de presión en estos tipos de lechos.

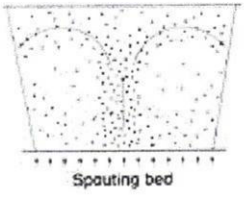
La técnica del lecho surtidor para el secado de granos se ha diseñado con el fin de obtener el mínimo costo en el sistema de secado y mejorar la calidad en los productos a secar.La simulación y optimización en los procesos es el mejor camino para obtener las apropiadas dimensiones y condiciones de operación en el secado **[20]**.El lecho surtidor es una técnica aplicada para secar granos de cereales,con eficiencias altas en comparación a los secadores convencionales.

El lecho surtidor tiene la característica de que el gas ingresa por un orificio en la base de la columna,formándose en la superficie libre del lecho,un chorro o surtidor que arrastra a las partículas originando un movimiento de

traslación a lo largo de la columna, favorecido este por un tronco de cono en la base de la columna para el mejor deslizamiento de las partículas, es de notar que hay una renovación constante de partículas que entran en contacto con el fluído **[13]**.

En el secado, la fase sólida es la que interesa como resultado de la operación y el agua es eliminada a temperaturas menores que la de ebullición.

FIGURA N°4 :Perfil de Distribución de los granos



durante la operación en Lecho Surtidor

Los lechos en surtidor eliminan el problema del gradiente de humedad, dado el constante movimiento de renovación de las partículas a lo largo del lecho.
La técnica del lecho surtidor ha sido aplicado a escala piloto para el secado de cereales, para lo cual ha sido posible usar temperaturas no muy elevadas de aire a la entrada del sistema de secado y por consiguiente realizar el secado sin dañar las partículas.
La tasa de extracción de agua que se ha encontrado, depende principalmente de la temperatura del aire de la entrada y de la humedad contenida en el grano.

Para determinar la mínima velocidad **[9]**que alcanza el surtidor se hace uso de la siguiente ecuación:

$$Vm = \left[\frac{D_p}{D_c}\right]\left[\frac{D_0}{D_c}\right]^{0.33}\left[\frac{2gL(\rho_p - \rho_f)}{\rho_f}\right]^{0.5} \qquad (9)$$

Donde: V_m es la velocidad mínima del surtidor, D_p es el diámetro de la partícula, D_0 es el diámetro del orificio de entrada del aire, D_c es el diámetro de la columna, L es la altura del lecho, ρ_f es la densidad del aire, ρ_p es la densidad de la partícula.

DETALLES EXPERIMENTALES Y PRESENTACION DE DATOS

EQUIPO EXPERIMENTAL:

El equipo utilizado en el presente trabajo consta de lo siguiente:

1.-Una columna de acero inoxidable quirúrgico cortada diametralmente;de 152,4 mm de diámetro y 1,3 m de altura, con una ventana de material acrílico transparente con la finalidad de observar el desplazamiento de los sólidos. (Fig.N°11)

2.-Dos columnas de acero inoxidable de 100 mm de diámetro interno y 80 cm de altura por 1.6 mm de espesor con un cono truncado en la base con 60° de inclinación respecto a la horizontal.(Fig.N°13)

3.-Un manómetro en U de vidrio de pirex, de 0.70 m de altura.(Fig.N°11)

5.-Para el flujo de aire se utiliza un orificio de entrada de 10 mm de diámetro,unido con bridas metálicas, empaquetaduras de jebe y una malla metálica número 100 .

6.- Un intercambiador de calor de coraza y tubos. (Fig.N°14)

7.-Un motor reductor de 0.65 Hp de potencia y 3.5 RPM,conectado a una tolva provista de un gusano sin fin,que permite regular la velocidad de alimentación de los granos a la columna de secado. (Fig.N°9)

8.-El contenido de humedad de los granos se determina mediante un equipo detector de humedad analógico modelo G-6C-565-E,s/n,G8137, Marca DELMHORST INSTRUMENT CO.(Fig.N°7)

9.- Balanza de Precisión ,marca Adam Equipment AFP/L SERIES. (Fig.N°8)

10.- Regulador de presión de aire,marca Micro(Fig. N°10)

11.- compresora (Fig.N°15)

Marca	INGERSOLL-Rand
Potencia	15Hp a 1750 rpm
SERIE N°	TP85194

12.-Caldera (Fig.N°16)

Marca	CLEAVER BROOKS
Modelo	VGB
SERIE N°	VB001021

13.-Rotámetro, medidor de flujo (Fig. N°12),

15.-Vasos precipitados de 10ml.

16.-Un Psicrómetro,marca ERTCO.

17.-Muestras de granos:

lenteja ,trigo,cebada,arroz y avena.

DESCRIPCION DEL PROCESO

El aire ingresa a la compresora según la fig.5-a,después el aire es controlado por medio de una válvula reguladora de presión (fig.5-c),antes de que ingrese al lecho surtidor(fig.5,k)en la cual se determinará la caída de presión de los granos en lecho surtidor.

Después que la presión del aire a sido regulada se procede al proceso de secado(Fig.5,g,h),en la cual el aire es calentado por medio de un intercambiador de calor (fig.5,d)antes de ingresar al calentador(fig.5,g),los granos que se encuentran en el calentador después de haber sido secados pasan al enfriador (fig5,h),donde el producto es recepcionado,para seguidamente realizar la lectura del contenido de humedad que tienen los granos al final del proceso de secado(fig.7)

METODOLOGÍA DEL TRABAJO EXPERIMENTAL:

Los porcentajes de humedad de los respectivos granos, al momento de ser adquiridos en el mercado fueron para el trigo 10.6%,para la cebada de 10.80%,para el arroz de 9.5% y para la avena de 11.0%,los cuales fueron determinados con el medidor de humedad que se presenta en la figura N°7.Para obtener un mayor rango de porcentajes de humedad en los granos se procede a incrementarles la humedad rociándolas previamente con agua de manera homogénea,luego las muestras se guardan herméticamente durante 24 horas.Los resultados después de este periodo de tiempo fueron: %humedad del trigo 16.9%,%humedad de la cebada 18.0%,%humedad del arroz 15.0% y %humedad de avena de 21.0%.Los granos con estos contenidos de humedad se alimentan a la columna de secado por medio de una tolva de alimentación(fig.6) y el flujo de aire que ingresa a la columna de secado(fig.5)es controlado por una válvula aguja. La presión del aire del sistema se regula por medio de una válvula reguladora de presión(fig.5,c) y el flujo se determina por un rotámetro instalado a la entrada de la columna.

El caudal de aire leído del rotámetro es corregido, a las condiciones estándares de presión y temperatura (294°K y 101 KPa).

Después de que los granos se transportan del calentador al enfriador(fig.5,g,h) cada 2 minutos se recepciona una pequeña muestra para determinar su humedad(fig.6).

Las densidades absolutas y aparentes de los granos de cereal se determinan usando el método de desplazamiento.

Para la caída de presión se trabaja con granos de lenteja, trigo y cebada a diferentes alturas de lecho asi como de 0.10m,0.15m y 0.20m;para cada variación del caudal se registraron los respectivos valores de presión y temperatura observándose que a mayor caudal se incrementa la caída de presión hasta el punto donde se produce el surtidor después de este punto la caída de presión desciende.

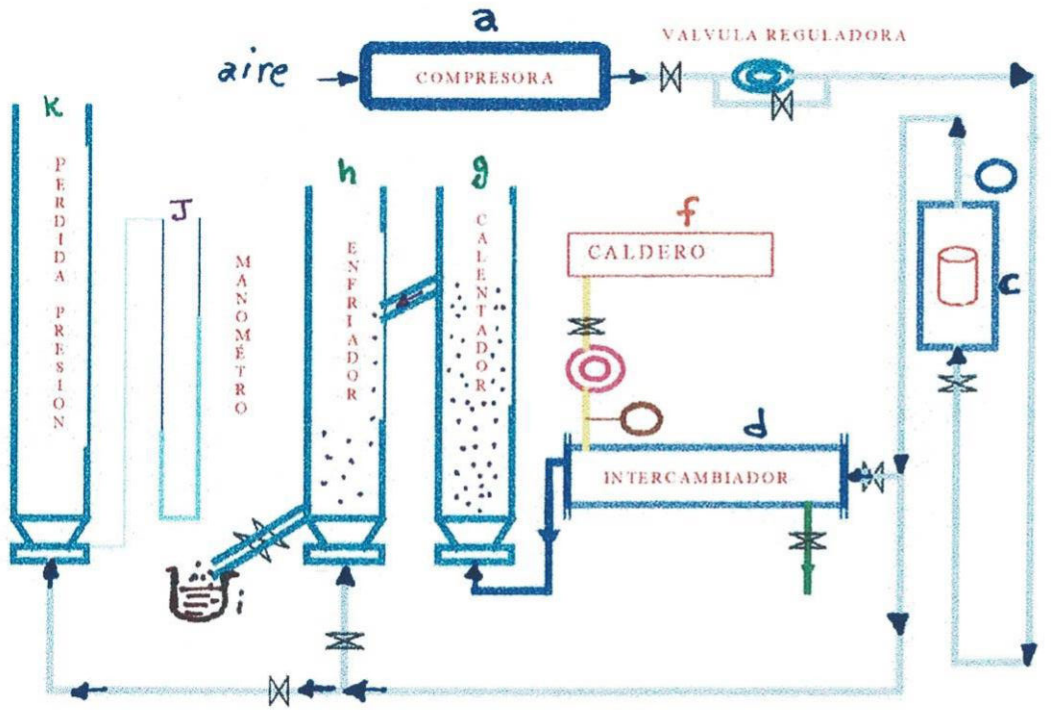


FIGURA N° 5 DIAGRAMA DEL EQUIPO EXPERIMENTAL

Nomenclatura:

a → Compresora
b → Válvula reguladora
c → Regulador de presión
d → Intercambiador de calor
e → Manómetro
f → Caldero
g → calentador
h → Enfriador
i → Producto
j → Manómetro en U
k → Pérdida de presión

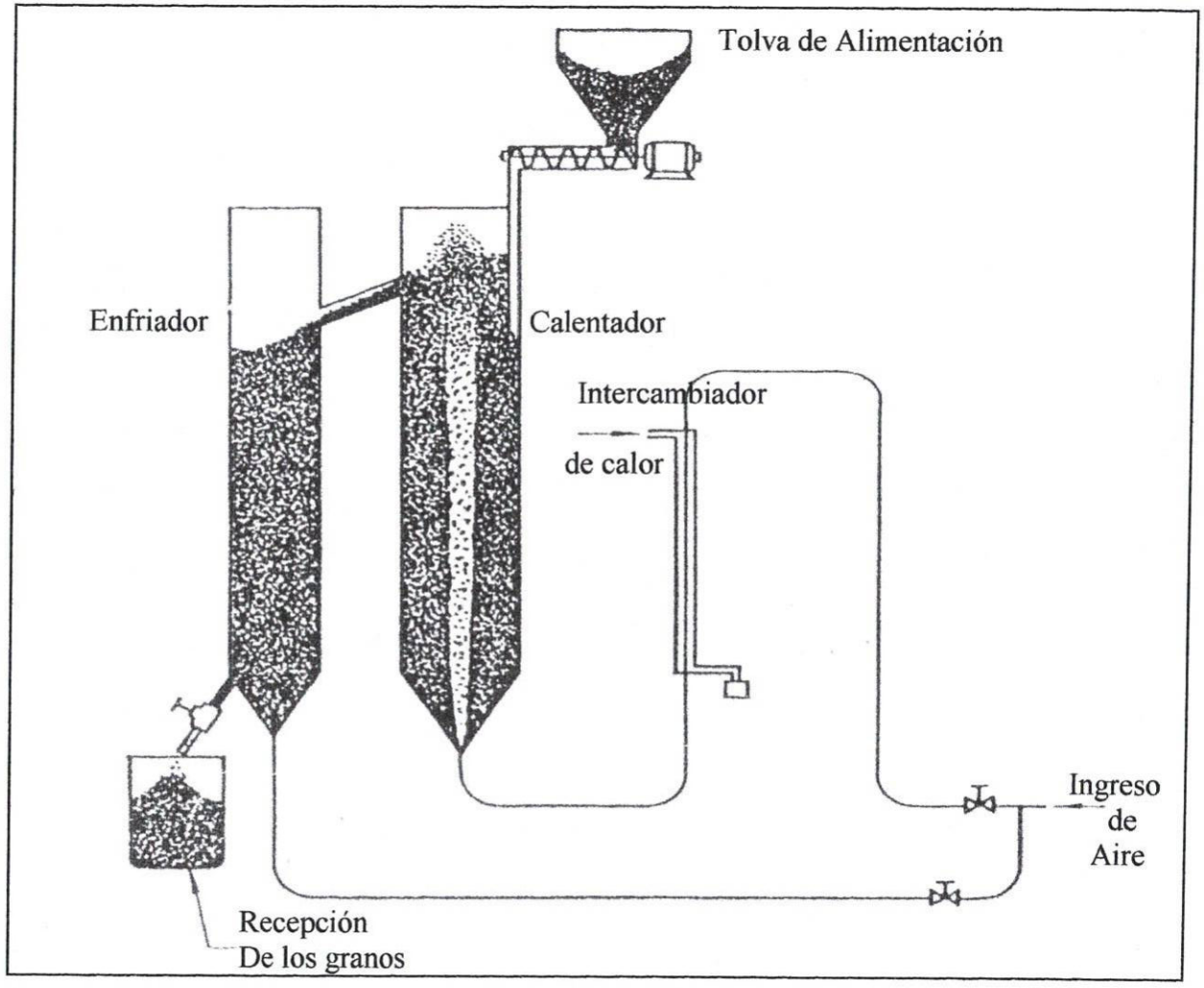


FIGURA N°6 EQUIPO DE SECADO EN LECHO SURTIDOR

DATOS EXPERIMENTALES

Tabla N°1 Condiciones de Laboratorio

Presión (mmHg)	756
Temperatura (°C)	23.5

Tabla N°2 Dimensiones del Equipo experimental

Diámetro interior de la Columna (m)	0.0762
Diámetro del orificio(m)	0.0102
Altura del Lecho(m)	0.8000

Tabla N°3 Propiedades Fisicoquímicas de la Partícula

Granos	Dp (m)	ε	Ψ	Humedad inicial(%)
Trigo	0.0038	0.400	0.900	16.9
Cebada	0.0042	0.444	0.800	18.0
Avena	0.0034	0.333	0.870	21.0
Arroz	0.0030	0.412	0.850	15.0
Lenteja	0.0049	0.480	0.720	17.2

Tabla N°4 Propiedades Físicas del Fluído

Temperatura Bulbo Seco (°C)	23.5
Temperatura Bulbo Húmedo (°C)	21.0
Humedad Absoluta (Kg.H_2O/Kg.Aire seco)	0.015
Volumen Húmedo(m^3aire húmedo/Kg aire seco)	0.860
Viscosidad del Aire (Kg/hm)	0.066
Densidad del aire (Kg/m^3)	1.184

Tabla N° 5 Características de los granos

Granos	Peso (gr)	Vol (ml)	$Vol_{despl.}$ (ml)	N° granos	Vol_{part} (cm^3)	ρ_{abs} (kg/m^3)	ρ_{apar} (kg/m^3)
Trigo	19.735	25	15	516	0.029	$1.316x10^3$	$0.789x10^3$
Cebada	10.513	18	10	563	0.038	$1.051x10^3$	$0.584x10^3$
Avena	8.042	12	8	400	0.020	$1.005x10^3$	$0.570x10^3$
Arroz	14.262	17	10	710	0.014	$1.426x10^3$	$0.839x10^3$
Lenteja	20.50	23	12	195	0.062	$1.700x10^{-3}$	$0.890x10^{-3}$

Tabla N° 6 Rango de los Parámetros de Operación

Parámetros	Trigo	Cebada	Avena	Arroz
Temperatura de bulbo seco(°C)a la salida del secado	38.6	47.2	33.8	39.5
Temperatura de bulbo húmedo(°C)a la salida del secado	25.5	27.3	23.8	25.3
Peso de la muestra (Kg)	3.085	2.650	2.800	2.545
Calor latente de vaporización(kcal/kg°C)	583.8	583.6	584.6	585.1
Mínima velocidad para producir el surtidor calculado	3.80	3.94	2.78	2.64
Tiempo de secado (min) experimental	45	62	80	66
Velocidad de secado constante (kg/hm^2) calculado	24.68	23.67	19.62	26.88
Coeficiente de transferencia de masa(kg/hm^2)calculado	$5.1x10^3$	$4.9x10^3$	$4.0x10^3$	$5.5x10^3$

TABLA N°7:TABLA DE LAS CAÍDAS DE PRESIÓN CALCULADAS Y EXPERIMENTALES EN FUNCIÓN A LA ALTURA DEL LECHO

Granos	0.10(m)		0.15(m)		0.20(m)	
	ΔP calculado	ΔP experimental	ΔP calculado	ΔP experimental	ΔP calculado	ΔP experimental
Trigo	80.2	115.2	114.8	169.3	158.5	169.3
Cebada	47.6	55.1	71.3	89.7	100.0	104.0
Lenteja	27.3	52.0	45.0	89.0	62.6	102.0

ΔP:Caída de presión (kg/m^2)

TABLA N°8: TABLA DE LA CAÍDA DE PRESIÓN EN FUNCIÓN AL DIÁMETRO DE LA PARTÍCULA Y FACTOR DE FORMA

Granos	Caída de Presión(kg/m^2)			Dp(m)	λ
	0.10(m)	0.15(m)	0.20(m)		
Trigo	115.2	169.3	169.3	0.0038	1.11
Cebada	55.1	89.7	104.0	0.0042	1.25
Lenteja	52.0	89.0	102.0	0.0049	1.39

TABLA N°9 CURVA DE CALIBRACION DEL ROTÁMETRO

Q Corregido (m^3/min)	Δ H1 (mm H_20)
0.13	-2.00
0.15	-2.00
0.17	-4.00
0.19	-6.00
0.21	-8.00
0.22	-10.00
0.24	-12.00
0.25	-16.00
0.25	-22.00
0.24	-32.00
0.25	-36.00
0.24	-48.00

Q Corregido (m^3/min)	Δ H2 (mm H_20)
0.13	-2.00
0.15	-4.00
0.17	-6.00
0.19	-6.00
0.21	-8.00
0.22	-10.00
0.23	-12.00
0.24	-18.00
0.25	-24.00
0.25	-30.00
0.24	-40.00
0.24	-48.00

Q Corregido (m^3/min)	Δ H3 (mm H_20)
0.13	-2.00
0.15	-4.00
0.17	-4.00
0.19	-6.00
0.21	-8.00
0.22	-10.00
0.23	-14.00
0.24	-18.00
0.25	-24.00
0.25	-28.00
0.25	-34.00
0.25	-48.00

TABLA N°10 CAIDA DE PRESION DE LA LENTEJA A UNA ALTURA DE LECHO DE 0.10 m

Q Corregido (m^3/min)	Δ P1 (mmHg)
0.13	1.28
0.16	1.88
0.18	3.98
0.19	4.80
0.21	7.95
0.23	4.43
0.24	3.60
0.25	1.58

Q Corregido (m^3/min)	Δ P2 (mmHg)
0.13	1.43
0.16	2.03
0.18	4.43
0.19	5.25
0.21	7.95
0.22	4.20
0.24	3.60
0.25	2.18

Q Corregido (m^3/min)	Δ P3 (mmHg)
0.13	1.13
0.16	2.25
0.18	4.20
0.19	4.95
0.21	7.80
0.22	4.43
0.24	4.95
0.25	1.73

TABLA N°11 CAIDA DE PRESION DE LA LENTEJA A UNA ALTURA DE LECHO DE 0.15 m

Q Corregido (m^3/min)	Δ P1 (mmHg)
0.13	3.23
0.16	4.43
0.17	5.93
0.19	7.50
0.20	8.48
0.23	9.90
0.24	7.65
0.26	6.38
0.25	4.95

Q Corregido (m^3/min)	Δ P2 (mmHg)
0.13	2.93
0.16	4.28
0.17	5.48
0.19	6.90
0.21	8.70
0.23	10.35
0.24	9.90
0.25	7.80
0.26	5.03

Q Corregido (m^3/min)	Δ P3 (mmHg)
0.13	2.85
0.16	4.28
0.17	5.63
0.19	7.05
0.21	8.55
0.23	10.05
0.24	9.38
0.25	6.30
0.26	5.03

TABLA N° 12 CAIDA DE PRESION DE LA LENTEJA A UNA ALTURA DE LECHO DE 0.20 m

Q Corregido (m^3/min)	Δ P1 (mmHg)
0.15	5.78
0.16	5.55
0.18	6.68
0.19	8.25
0.21	10.05
0.24	12.45
0.25	11.85
0.25	8.85
0.26	7.05
0.26	6.90
0.27	4.13
0.27	4.13

Q Corregido (m^3/min)	Δ P2 (mmHg)
0.15	5.48
0.16	4.28
0.17	5.78
0.19	7.20
0.21	8.55
0.23	10.95
0.25	12.60
0.25	10.58
0.26	8.63
0.27	6.68
0.27	4.13
0.27	4.05

Q Corregido (m^3/min)	Δ P3 (mmHg)
0.14	4.65
0.16	6.08
0.17	7.50
0.19	9.60
0.21	11.40
0.23	12.30
0.25	10.13
0.25	7.95
0.26	6.68
0.27	4.28
0.27	3.98
0.27	3.98

TABLA N°13 CAIDA DE PRESION DEL TRIGO A UNA ALTURA DE LECHO DE 0.10 m

Q Corregido (m^3/min)	Δ P1 (mmHg)	Q Corregido (m^3/min)	Δ P2 (mmHg)	Q Corregido (m^3/min)	Δ P3 (mmHg)
0.13	5.85	0.13	6.00	0.13	6.00
0.15	8.33	0.15	8.63	0.16	8.03
0.18	11.03	0.18	11.63	0.18	10.65
0.19	13.80	0.19	14.70	0.19	13.50
0.21	17.55	0.21	17.10	0.21	17.18
0.23	16.88	0.23	18.90	0.23	18.30
0.24	11.78	0.24	10.05	0.24	11.78
0.25	7.50	0.26	7.73	0.25	7.35
0.26	6.00	0.27	6.23	0.26	6.15
0.27	4.43	0.27	4.58	0.27	2.33
0.29	1.13	0.28	0.30	0.27	-0.68
0.29	-1.28	0.28	-2.25	0.28	-1.58

TABLA N°14 CAIDA DE PRESION DEL TRIGO A UNA ALTURA DE LECHO DE 0.15 m

Q Corregido (m^3/min)	Δ P1 (mmHg)
0.13	7.20
0.15	10.88
0.18	13.73
0.19	17.48
0.21	14.18
0.22	25.20
0.24	14.63
0.25	10.28
0.26	8.70
0.26	7.35
0.26	2.25

Q Corregido (m^3/min)	Δ P2 (mmHg)
0.13	7.58
0.15	9.75
0.17	14.55
0.19	17.48
0.21	21.98
0.23	25..50
0.24	14.48
0.28	10.35
0.25	7.88
0.26	6.75
0.26	1.80

Q Corregido (m^3/min)	Δ P3 (mmHg)
0.13	7.20
0.15	10.58
0.17	13.95
0.19	17.33
0.21	20.70
0.22	24.98
0.23	14.10
0.24	9.45
0.25	8.25
0.25	6.15
0.26	1.88

TABLA N°15 CAIDA DE PRESION DEL TRIGO A UNA ALTURA DE LECHO DE 0.20 m

Q Corregido (m^3/min)	Δ P1 (mmHg)
0.13	6.30
0.16	8.78
0.18	11.78
0.19	15.15
0.21	18.83
0.23	24.30
0.24	24.23
0.25	13.95
0.26	11.63
0.26	10.20
0.26	5.10
0.26	2.48

Q Corregido (m^3/min)	Δ P2 (mmHg)
0.13	5.78
0.16	8.03
0.17	10.50
0.19	12.90
0.21	15.30
0.22	21.45
0.24	24.90
0.24	15.23
0.25	11.48
0.26	9.60
0.26	5.48
0.26	1.65

Q Corregido (m^3/min)	Δ P3 (mmHg)
0.13	6.60
0.16	8.63
0.18	11.40
0.19	15.30
0.21	19.35
0.22	25.05
0.24	26.25
0.25	13.20
0.25	10.95
0.26	9.60
0.26	4.65
0.26	2.03

TABLA N°16 CAIDA DE PRESION DE LA CEBADA A UNA ALTURA DE LECHO DE 0.10 m

Q Corregido (m^3/min)	Δ P1 (mmHg)
0.13	2.78
0.16	4.13
0.18	5.48
0.19	7.05
0.21	9.45
0.23	8.93
0.24	6.60
0.25	4.58

Q Corregido (m^3/min)	Δ P2 (mmHg)
0.13	2.48
0.16	4.28
0.18	5.93
0.19	7.50
0.21	9.45
0.22	8.70
0.24	5.85
0.25	4.43

Q Corregido (m^3/min)	Δ P3 (mmHg)
0.13	2.63
0.16	4.50
0.18	5.70
0.19	7.20
0.21	9.30
0.22	9.08
0.24	6.00
0.25	4.73

TABLA N°17 CAIDA DE PRESION DE LA CEBADA A UNA ALTURA DE LECHO DE 0.15 m

Q Corregido (m^3/min)	Δ P1 (mmHg)
0.13	3.23
0.16	4.43
0.17	5.93
0.19	7.50
0.21	8.48
0.23	9.90
0.24	7.65
0.25	6.38
0.25	4.95

Q Corregido (m^3/min)	Δ P2 (mmHg)
0.13	2.93
0.16	4.28
0.17	5.48
0.19	6.90
0.21	8.70
0.23	10.35
0.24	9.90
0.25	7.80
0.26	5.03

Q Corregido (m^3/min)	Δ P3 (mmHg)
0.13	2.85
0.16	4.28
0.17	5.63
0.19	7.05
0.21	8.55
0.23	10.05
0.24	9.38
0.25	6.30
0.26	5.03

TABLA N° 18 CAIDA DE PRESION DE LA CEBADA A UNA ALTURA DE LECHO DE 0.20 m

Q Corregido (m^3/min)	Δ P1 (mmHg)
0.13	4.28
0.16	5.55
0.18	6.68
0.19	8.25
0.21	10.05
0.23	12.45
0.24	11.85
0.25	8.85
0.26	7.05
0.26	6.90
0.27	4.13

Q Corregido (m^3/min)	Δ P2 (mmHg)
0.13	3.23
0.16	4.28
0.17	5.78
0.19	7.20
0.21	8.55
0.23	10.95
0.24	12.60
0.25	10.58
0.26	8.63
0.27	6.68
0.27	4.13

Q Corregido (m^3/min)	Δ P3 (mmHg)
0.13	3.68
0.16	4.65
0.17	6.08
0.19	7.50
0.21	9.60
0.23	11.40
0.24	12.30
0.25	10.13
0.26	7.95
0.27	6.68
0.27	4.28

Tabla N° 19 Cuadro de Porcentajes de humedad, temperatura de entrada y salida del fluído en función del tiempo de secado para el trigo

t(min)	%humedad	T°salida °C	T°entrada °C
0	16.90	38.0	100.1
2	16.70	38.3	100.3
4	16.40	38.5	100.7
6	16.20	38.7	100.9
8	15.90	39.0	101.2
10	15.60	39.3	101.5
12	15.20	39.5	101.9
14	14.80	39.7	102.0
16	14.40	39.8	102.2
18	14.00	40.0	102.7
20	13.65	40.2	102.9
22	13.25	40.3	103.2
24	12.90	40.5	103.4
26	12.55	40.6	103.6
28	12.25	40.7	103.7
30	12.00	40.8	103.9
32	11.80	40.9	104.5
34	11.60	41.0	104.9
35	11.50	41.0	105.0
36	11.40	41.3	105.2
37	11.30	41.5	105.5
38	11.25	41.7	105.7
39	11.17	41.8	105.9
40	11.15	41.9	106.0
41	11.15	42.1	106.4
42	11.15	42.3	106.7
43	11.15	42.5	106.9
44	11.15	42.7	107.2
45	11.15	42.9	107.5

Tabla N°20 Cuadro de Porcentajes de humedad, temperatura de entrada y salida del fluído en función del tiempo de secado para la cebada

t(min)	%humedad	T°salida °C	T°entrada °C
0	18.00	46.5	99.7
2	17.80	46.7	100.1
4	17.50	46.9	100.5
6	17.30	47.0	100.8
8	17.00	47.2	101.0
10	16.75	47.4	101.5
12	16.45	47.5	101.8
14	16.10	47.7	101.9
16	15.80	47.9	102.3
18	15.40	48.1	102.5
20	15.15	48.3	103.8
22	14.75	48.5	104.0
24	14.45	48.7	104.5
26	14.10	48.9	104.7
28	13.85	49.1	104.9
30	13.50	49.5	105.0
32	13.20	50.0	105.7
34	12.89	50.2	105.9
36	12.55	50.5	106.0
38	12.33	50.9	106.4
40	12.19	51.2	106.8
42	12.00	51.6	107.0
44	11.85	51.8	107.5
46	11.70	51.9	107.9
48	11.60	52.3	108.0
50	11.57	52.8	108.2
52	11.55	53.0	108.6
54	11.50	53.4	108.9
56	11.45	53.7	109.2
58	11.45	53.9	109.5
60	11.45	54.5	109.9
62	11.45	54.8	110.2

Tabla N°21 Cuadro de Porcentajes de humedad, temperatura de entrada y salida del fluído en función del tiempo de secado para el arroz

t(min)	%humedad	T°salida °C	T°entrada °C
0	15.00	38.0	96.1
2	14.80	38.3	96.5
4	14.55	38.5	96.7
6	14.25	38.7	96.9
8	14.00	38.9	97.2
10	13.65	39.1	97.5
12	13.35	39.5	97.7
14	13.10	39.9	97.9
16	12.90	40.1	98.1
18	12.65	40.2	98.3
20	12.40	40.5	98.6
22	12.10	40.7	98.7
24	11.85	40.9	98.9
26	11.70	41.0	99.2
28	11.40	41.3	99.3
30	11.20	41.5	99.5
32	11.00	41.7	99.7
34	10.80	41.9	99.9
36	10.65	42.1	100.0
38	10.50	42.5	100.2
40	10.30	42.8	100.5
42	10.20	42.9	100.7
44	10.10	43.1	100.9
46	10.00	43.3	101.2
48	9.90	43.5	101.3
50	9.85	43.7	101.5
52	9.75	43.9	101.7
54	9.70	44.0	101.9
56	9.70	44.2	102.1
58	9.70	44.5	102.3
60	9.70	44.7	102.5
62	9.70	44.9	102.8
64	9.70	45.2	103.1
66	9.70	45.7	103.5

Tabla N° 22 Cuadro de Porcentajes de humedad, temperatura de entrada y salida del fluído en función del tiempo de secado para la avena

t(min)	%humedad	T°salida °C	T°entrada °C
0	21.00	35.0	99.0
2	20.45	35.4	99.3
4	20.15	35.8	99.5
6	19.70	36.1	99.7
8	19.30	36.6	99.9
10	19.00	36.8	100.0
12	18.70	37.0	100.2
14	18.30	37.5	100.5
16	18.00	38.0	100.7
18	17.70	38.3	100.9
20	17.35	38.5	101.2
22	17.10	38.7	101.3
24	16.85	39.0	101.5
26	16.50	39.3	101.7
28	16.20	39.5	101.9
30	15.90	39.7	102.1
32	15.55	39.8	102.3
34	15.30	40.0	102.5
36	15.05	40.2	102.8
38	14.70	40.3	103.1
40	14.40	40.5	103.5
42	14.10	40.6	104.0
44	13.85	40.7	104.5
46	13.70	40.8	104.7
48	13.50	40.9	104.9
50	13.40	41.0	105.0
52	13.25	41.0	105.7
54	13.15	41.3	105.9
56	13.05	41.5	106.0
58	12.95	41.7	106.4
60	12.90	41.8	106.8
62	12.85	42.5	107.0
64	12.80	42.9	107.5
66	12.75	43.3	107.9

68	12.70	43.8	108.0
70	12.65	44.1	108.2
72	12.60	44.3	108.6
74	12.60	44.6	108.9
76	12.60	44.9	109.2
78	12.60	45.2	109.5
80	12.60	45.8	109.9

METODOS DE CALCULO

I).-Fluídos a condiciones estándar Perry [4] :

Densidad del aire(ρ_{aire})=0.00129$\frac{gr}{cm^3}$

Viscosidad absoluta del aire(μ_{aire})=0.00017$\frac{gr}{cm-seg}$

Corrección a condiciones de Laboratorio:

$$\rho_{aire}(23.5°C)=0.00129\left(\frac{273}{23.5+273}\right)\times\frac{756}{760}$$

$$\rho_{aire}(23.5°C)=0.00118\frac{gr}{cm^3}=1.184\frac{Kg}{m^3}$$

Para la corrección de la viscosidad del aire Perry **[4]** indica que es aplicable la siguiente ecuación:

$$\mu = (\mu_0)\left(\frac{T}{T_0}\right)^n$$

$$\mu_{aire}(23.5°C)= 0.00017\left(\frac{23.5+273}{273}\right)^{0.786}$$

$$\mu_{aire}(23.5°C)=0.00018\frac{gr}{cm-seg}$$

$$\mu_{aire}(23.5°C)=0.066\frac{Kg}{h-m}$$

donde: T y T_0 son temperaturas absolutas del sistema a 0°C, μ_0 es la viscosidad del aire a 0°C, μ es la viscosidad del aire a 23.5°C y n es una constante obtenida del manual del Ingeniero Químico Perry **[4]**,en un rango de temperaturas de 0 y 300°C.

Para el cálculo de las propiedades de los cereales se toma como ejemplo de cálculo al trigo, estas propiedades se presentan en la tabla N°5:

II).- Densidad Absoluta (ρ_s): Se determina por el método de desplazamiento.

Peso trigo	:	19.735 gr.
N° de granos	:	516
Volúmen desplazado	:	15 ml
Densidad absoluta	:	$\frac{19.735}{15} = 1.316 \times 10^3 \left(\frac{Kg}{m^3}\right)$

III).- Densidad Aparente (ρ_{sp}):

Peso trigo	:	19.735 gr.
Volumen	:	25 ml
Densidad aparente	:	$\frac{19.735}{25} = 0.789 \times 10^3 \left(\frac{Kg}{m^3}\right)$

IV).-Volúmen de la partícula:

$$V_p = \frac{vol.\ desplazado}{N°\ de\ particulas}$$

$$V_p = \frac{15}{516} = 0.029\ cm^3$$

V).- Diámetro de la Partícula (D_p): Para determinar el diámetro de la partícula se considera a los granos como una partícula esférica.

$$D_p = \sqrt[3]{\frac{6\,V_p}{\pi}} = \sqrt[3]{\frac{6\times 0.029}{3.1416}} = 0.38 \text{ cm}$$

$$D_p = 3.8\times10^{-3} \text{ m}$$

VI).- Porosidad(ε): Se calcula utilizando las densidades absoluta y aparente.

$$\varepsilon = 1 - \frac{Densidad\ aparente}{Densidad\ absoluta}$$

$$\varepsilon = 1 - \frac{0.789}{1.316} = 0.40$$

VII).- Esfericidad(Ψ): La esfericidad se obtiene utilizando la gráfica de esfericidad vs porosidad presentada en el apéndice II, los resultados se presentan en la tabla N°3.

VIII).- Flujo másico de aire($\dot{m}$)por unidad de área del cilindro vacío $\frac{Kg}{m^2 h}$ **:**

$$\dot{m} = \frac{Q\times\rho}{A}$$

$$A = \frac{\pi D_c^{\,2}}{4} = \frac{3.1416(0.0762\ m)^2}{4} = 0.0046\ m^2$$

$$\rho_{aire} = 1.184\ \frac{Kg}{m^3}$$

$$Q = 13.05\frac{m^3}{h}$$

El caudal ha sido tomado a una altura de lecho de 0.20m

Reemplazando datos:

$$\dot{m} = \frac{13.05\frac{m^3}{h} \times 1.184\frac{kg}{m^3}}{0.0046m^2} = 3358.9\frac{kg}{hm^2}$$

onde:Q,ρ,A, D_c, son el caudal expresado en $\left(\frac{m^3}{h}\right)$, la densidad del aire,el área de la sección transversal de la columna vacía y el diámetro interior de la columna.

IX).- CAIDA DE PRESION EN LECHO SURTIDOR:

D_p = 3.8x10^{-3} m (tabla N°3)

μ_f =0.066$\frac{Kg}{h-m}$ (tabla N°4)

ρ_f= 1.184$\frac{Kg}{m^3}$ (tabla N°4)

λ = 1.111

ε = 0.400 (tabla N°3)

$\dot{m}$ = 3358.9$\left(\frac{Kg}{m^2 h}\right)$ (tabla N°6)

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{1120 \times 3358.9\frac{kg}{m^2 h} \times 0.066\frac{kg}{h-m} \times 1.11^2 \times (1-0.40)^2}{3.8^2 \times 10^{-6} m^2 \times 1.184\frac{kg}{m^3} \times 9.8\frac{m}{s^2} \times 3600^2\frac{s^2}{h^2} \times 0.40^3} = 158.5\frac{Kg}{m^2}$$

X).-Cálculo de la mínima velocidad para desarrollar el surtidor:

$$Vm = \left[\frac{D_p}{D_c}\right]\left[\frac{D_0}{D_c}\right]^{0.33}\left[\frac{2gL(\rho_p - \rho_f)}{\rho_f}\right]^{0.5}$$

$$Vm = \left[\frac{0.0038m}{0.0762m}\right]\left[\frac{0.0102m}{0.0762m}\right]^{0.33}\left[\frac{2. \times 9.8\frac{m}{s^2} \times 0.8m\left(1.316 \times 10^3\frac{kg}{m^3} - 1.184\frac{kg}{m^3}\right)}{1.184\frac{kg}{m^3}}\right]^{0.5}$$

Vm=3.8m/s

XI).- Determinación del coeficiente de transferencia de masa(Ky) :

Partiendo de la ecuación 6:

$$Ky = \frac{\left(\frac{dw}{A\,dt}\right)}{(H_w - H_g)}$$

$\frac{dw}{dt}$ = Es la pendiente de la curva de secado

$$\text{Vel.}_{\text{secado constante}} = \frac{dw}{A\,dt} = \left(\frac{1}{0.381\,m^2}\right)\left(0.1567\frac{kg}{\min} \times \frac{60\,\min}{1\,h}\right) = 24.67\frac{kg}{h\,m^2}$$

C_p=Calor específico $\frac{Kcal}{Kg_{aire}\,°C}$

λ_0=Calor latente de vaporización 583.80 $\frac{Kcal}{Kg_{agua}}$

C_p= 0.21+0.46(H_{abs})

C_p=0.21+0.46x0.015 = 0.2169 $\frac{Kcal}{Kg_{aire}\,°C}$

$$(H_w - H_g) = \frac{C_p(t_{bs} - t_{bh})}{\lambda_0}$$

$$(H_w - H_g) = \frac{0.2169(38.6 - 25.5)}{583.80} = 4.86x10^{-3}\ \frac{Kg_{agua}}{Kg_{aire}}$$

$$Ky = 24.67\frac{kg_{agua}}{h\,m^2}\ x\frac{1}{0.00486\frac{kg_{agua}}{kg_{aire}}} = 5.1x10^3\ \frac{Kg_{aire}}{m^2 h}$$

El coeficiente de transferencia de masa para los granos de arroz,cebada y avena se encuentran en la tabla N°6.

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En la tabla N°3 se presentan los valores de las propiedades fisicoquímicas de los granos tales como porosidad y esfericidad.Para el cálculo del diámetro equivalente de los granos se consideró que el volúmen de la partícula es igual al volúmen de una esfera.

Los datos experimentales de la caída de presión en función del flujo de aire en la columna vacía se presentan en la gráfica N°1,la curva de los puntos experimentales se presentan con un intervalo de confianza del 95%,los cuales fueron desarrollados mediante un ajuste de mínimos cuadrados.

Para los granos de lenteja trigo y cebada en la cual,el diámetro de partícula varía de 0.0038 a 0.0049m,la caída de presión experimental se encuentra en el rango de 52 a $169.3\ \frac{kg}{m^2}$,mientras que las caídas de presión calculadas se encuentra en el rango de 27.3 a $158.5\frac{kg}{m^2}$.

Al comparar la caída de presión,para los cereales de trigo,lenteja y cebada a una misma altura de lecho,se observa que entre los 3,el trigo posee mayor caída de presión,esto debido a que el trigo posee menor diámetro y mayor esfericidad en comparación a los granos de cebada y lenteja.

La caída de presión en función a la altura de lecho,tiene el siguiente comportamiento:el trigo es mayor que la cebada y la cebada es mayor que la lenteja,la caída de presión en función de la esfericidad guardan una relación directamente proporcional,estos datos se presentan en la siguiente tabla:

Granos	Caída de Presión(kg/m^2)			Dp(m)	ψ
	0.10(m)	0.15(m)	0.20(m)		
Trigo	115.2	169.3	169.3	0.0038	0.90
Cebada	55.1	89.7	104.0	0.0042	0.80
Lenteja	52.0	89.0	102.0	0.0049	0.72

En el presente trabajo se asume que la humedad absoluta es escencialmente constante durante el proceso de secado y que la cantidad de agua evaporada es relativamente pequeña comparado con la masa total del aire involucrado,de este modo la humedad absoluta del aire y la temperatura de bulbo húmedo se obtienen haciendo uso de la carta psicrométrica.

La gráfica de la curva de secado para los granos de trigo,cebada,arroz y avena, lo observamos en las gráficas N°4,5,6,7.La velocidad de secado constante,se representa desde la humedad inicial hasta la humedad en la cual se encuentra el tiempo crítico,después del tiempo crítico la velocidad de secado es decreciente.

Para el trigo el tiempo crítico,se encuentra a los 18 min,para la cebada 24 min,para el arroz y para la avena 36 min.

La velocidad de secado es constante desde la humedad inicial hasta una humedad de 14.20% para el trigo,14.45% para la cebada,10.65% para el arroz y 14.7% para la avena,estas humedades corresponden al tiempo crítico.

Los coeficientes de transferencia de masa se encuentran en un rango de $4.0x10^3$ a $5.5x10^3(kg/hm^2)$.

CONCLUSIONES

1.Para una misma altura de lecho la caída de presión en el caso del trigo es mayor que en los casos de la cebada y lenteja.Esto se debe a que el diámetro del trigo es menor que el diámetro de la cebada y a la vez menor que el diámetro de la lenteja.

2.La velocidad minima para alcanzar el surtidor (spouting),guarda una relación directamente proporcional con el tamaño de partículas.

3.Durante las pruebas experimentales el proceso de secado se lleva a cabo a velocidad de secado constante,en donde el tiempo crítico, para el trigo se encuentra a 18 min,para la cebada 24 min,para el arroz y para la avena en 36 min.

RECOMENDACIONES

1.Las medidas de la caída de presión en la columna; variando el ingreso del aire en el orificio y el ángulo de cono podrían ser tomadas como un factor para determinar los efectos de estas variables en las correlaciones derivadas en este trabajo.

2.Verificar que durante la obtención de los datos experimentales, no se obstruya el orificio de entrada del aire.

3.Se recomienda que después de haber realizado el secado de los granos se tome inmediatamente la medida del contenido de humedad,para que los granos no absorvan la humedad del ambiente,para lo cual el equipo medidor de humedad deberá encontrarse lo mas cerca de las columnas de secado.

4.Al momento de llenar la tolva con los granos esta se debe realizar cuidadosamente ya que si se hace apresuradamente,los granos podrían obstruir la entrada de la alimentación y la bomba reductora se detendría.

5.Cuando se trabaja con granos diferentes se debe tener especial cuidado de que al final de cada secado, se aspire por completo los granos de las columnas de secado para evitar que se mezclen entre si y no se pueda tener una lectura exacta de los contenidos de humedad.

NOMENCLATURA DE TERMINOS UTILIZADOS EN EL PRESENTE TRABAJO

ΔP = Caída de presión $\frac{Kg}{m^2 m}$

μ = Viscosidad del aire $\frac{Kg}{m-s}$

ρ_f = Densidad del aire $\frac{Kg}{m^3}$

ρ_p = Densidad de la partícula $\frac{Kg}{m^3}$

λ = Factor de forma

ε = Porosidad de la partícula.

Ψ = Esfericidad

D_p = Diámetro de la partícula (m)

D_0 = Diámetro del orificio de entrada del aire(m)

D_c = Diámetro de la Columna(m)

L = Altura del lecho (m)

V_m=Velocidad mínima para producir el surtidor (m/s)

$\dot{m}$ =Flujo de másico de aire por unidad de área $\frac{Kg}{m^2 h}$

Cp=Calor específico $\frac{Kcal}{Kg°C}$

g_c=constante de gravedad(m/s^2)

Ky=Coeficiente de transferencia de masa $\frac{Kg_{H_2O}\ evap.}{m^2 h}$

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
BIBLIOTECA CENTRAL

$(H_w - H_g)$=Diferencia de humedad $\frac{kg_{agua}}{kg_{aire}}$

T_{bs}=Temperatura del bulbo seco a la salida del lecho surtidor(°C)

T_{bh}=Temperatura del bulbo húmedo a la salida del lecho surtidor(°C)

λ_0 =Calor latente de vaporización$(\frac{Kcal}{Kg_{agua}})$

$\frac{dw}{Adt}$=Velocidad de secado constante

H_{abs}=Humedad absoluta

27645

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1.-STANSFIELD, E. Y W.H. COOK, The Drying of Wheat,National Council Report, Nro.25(1932).

2.-BIRCHARD, F.J., Dominion Grain Research Laboratory, 7th Anual Report,pag.14-16,(1933).

3.-CASHMORE, W.H., Agriculture,Vol.49, N°3,pag.144,(1942).

4.-Perry J.H.,editor,"Chemical engineers'Handbook" 3rd,ed.,

pag.456.McGraw-Hill Book Co.,Inc.,New York(1950).

5.- LEVA, M., WIENTRAUB, M., GRUMMER, M., POLICHICK, M. AND STORCH, H., H., "Fluid Flow Through Packed and Fluidized Systems", Bulletin N°504, Bureau of Mines, U.S.A. (1951).

6.-MATHUR, K.B., P.E. GISHLER, "Wheat Drying Using The Spouted Bed Technique", National Research Council of Canada, Ottawa, October (1953).

7.-MATHUR, K. B. AND GISHLER, P. E., "A technique for Contacting Gases with Coarse Solid Particles", A.I.Ch.E. Journal,Vol.1(2),pag.157,(1955).

8.- LAMA, R.F., "Pressure Drop in Spouted Beds", Thesis of Master of Science in Chemical Engineering, University of Ottawa, Canada (1957).

9.- MADONNA, L. A., AND LAMA, R.F., "The Derivation of an Equation for Predicting Mínimum Spouting Velocity", A.I.Ch.E. Journal, 4(4),pag.497,(1958).

10.- PARENT,YAGOL Y STEINER "Pressure Drop in Spouted Beds", Ind. and Eng. Chem. , 52(2),pag.169(1960).

11.-MALEK M.A.,AND LU,BENJAMÍN C.Y.,"Pressure Drop and Spoutable bed Heights in Spouted Beds",Ind.Eng.Chem.Process Des.Dev.Vol.4,N°1,pag. 123-128,(1965).

12.-MIKHAILIK,V,D.,"Research on Heat and Mass Transfer in Technological Processes",pag.37,(1965).

13.-PASSOS,L.M., MUJUMDAR, A.S.AND RAGHAVAN, G.S.V., "Spouted beds for drying; principles and design

considerations", Advances in Drying, ed. A.S. Mujumdar, Vol. 4, Hemisphere Publishing Corporation, pag. 101 - 138.
R. E. TREYBAL, Mass Transfer Operations. McGraw-Hill, New York (1968).

14.-BAKKER-ARKEMA, F.W., LEREW, L.E., DE BOER, S.F. y ROTH, M.C. "Grain Dryer Simulation" Research Report from Michigan State University,pag.80-85,(1974).

15.-SOKHANSANJ, S., ULLYOTT, T.E., KENT, M.D., MACAULAC, J.D. NYBOR, E.O., y WASSERMANN, J.D."Preparation and conditioning of grain for drying tests". St.Joseph Michigan, U.S.A. ASAE Paper N°80,pag.3514.(1980).

16.-ZURIT, C.A. Y R. P. SINGH, "Simulation of Rough rice Drying in Spouted Bed",Ed. Mc Graw-Hill/Hemisphere, New York, 239-247,(1982).

17.-TOSI, E., RE, E.D., TAPIZ, L.M. y MASCIARELLI, R. "Influencia de la temperatura final del grano, tiempo de residencia e intensidad de secado en la modificación de la calidad panadera". I Congreso Nacional de Trigo, Capítulo II: 1-6.Del 6 al 10 de Octubre,(1986).

18.-BAKKER-ARKEMA, F.W., MAIER, D.E. y SCHISLER, I.P."Drying rates and drying capacities of different seed grains" Drying Technology,Vol. 5,pag.527-540,(1987).

19.-DRISCOLL, R.H. y ADAMCZAK, T."Drying Systems for the Humid Tropics". Proceedings of an International Workshop held at Kuala Lumpur, Malaysia.ACIAR Proceedings N° 22,pag.58-68,October (1987).

20.-J. NÉMETH, E. PALLAI AND E. ARADI, "Development of Spouted Bed Dryer", A.S. Mujumdar, M.A. Roques,Ed. Hemisphere Publishing Corporation, New York, pag.158 - 165 , (1989).

21.-A.S. MUJUMDAR, "Spouted Bed Technology - A Brief Review", Drying'89, A.S. Mujumdar, M.A. Roques Ed. Hemisphere Publishing Corporation, New York, pag. 151 - 157,(1989).

22.-OSPINA, J.E. y CRUZ, N."Simulación Matemática del Proceso de Secado de Granos". Revista Latinoamericana ACOGRANOS, Bogotá Colombia,Vol. N°6,pag.14-22.(1989).

23.-WARREN L.MCCABE,JULIAN C.SMITH,PETER HARRIOTT,"Operaciones Básicas de Ingeniería Química",cuarta edición,McGraw-Hill,pág.324-353,(1991).

24.-ZAHED, A.H. AND N. EPSTEIN, "Batch and Continuous Spouted Bed Drying of Cereal Grains: The Thermal Equilibrium Model", Canadian Journal Chemical Engineering,vol. 70,pag.945-953, (1992).

25.-M.I.KALWAR,G.S.V.RAGHAVAN AND A.S. MUJUMDAR, "Circulation of Particles in Two-dimensional Spouted Beds with Draft Plates", Power Technology, Vol. 77, pag. 233 - 242,(1993).

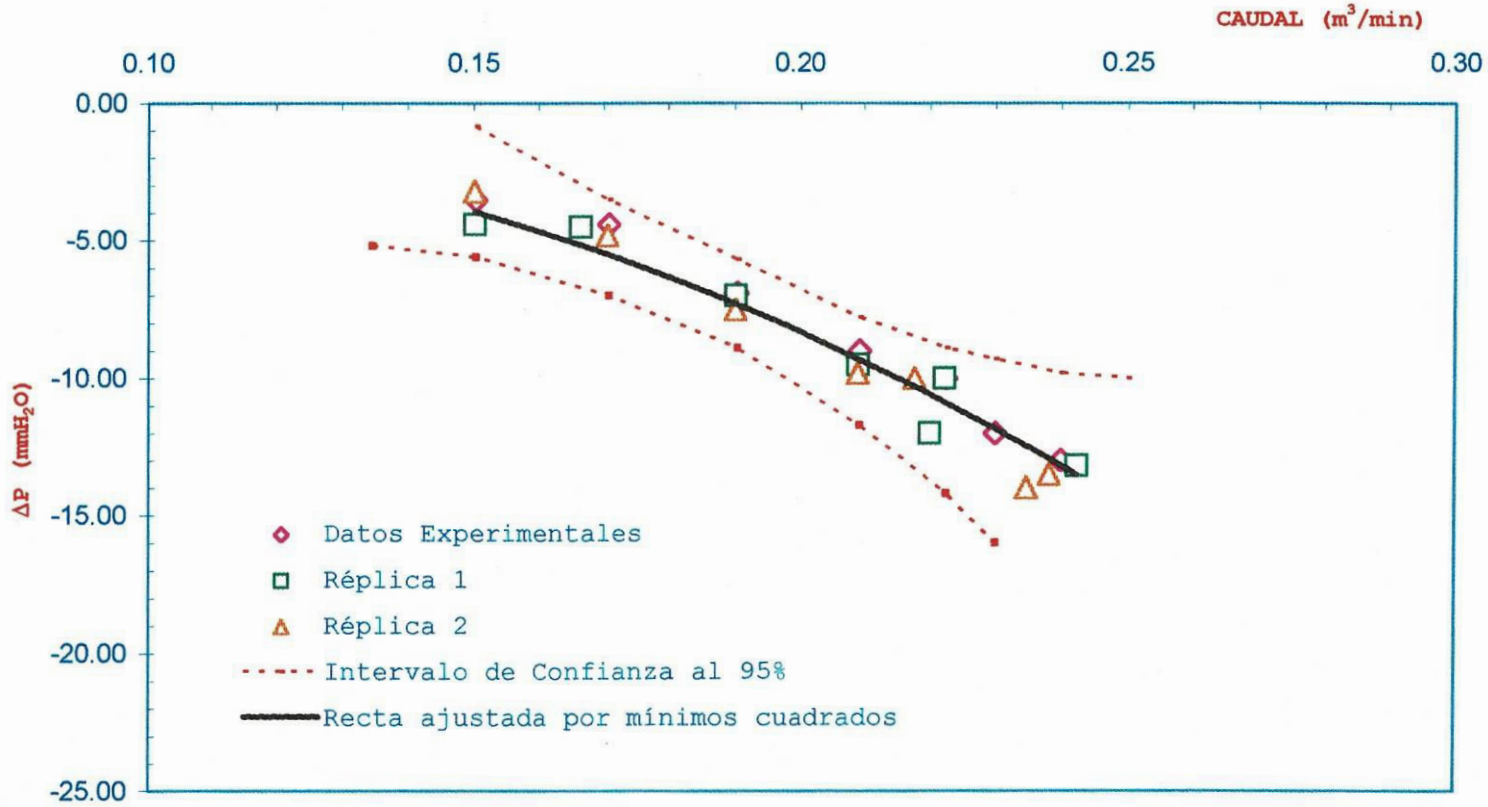
26.-DEVAHASTIN,S.,MUJUMDAR,A.S.,RAGHAVAN,G.S.V."Spouted Beds Research at McGill University," Proceedings of the International Conference on Food Industry Technology and Energy Applications, Bangkok, Thailand,pag. 22-29.(1996).

27.-ALAN S. FOUST,LEONARD A. WENZEL,CURTIS W.CLUMP,LOUIS MAUS,L.BRYCE ANDERSEN,"Principios de Operaciones Unitarias". Segunda Edición,Compañía Editorial Continental,S.A.de C.V.México,Sexta reimpresión México, pág.459-467,(1997).

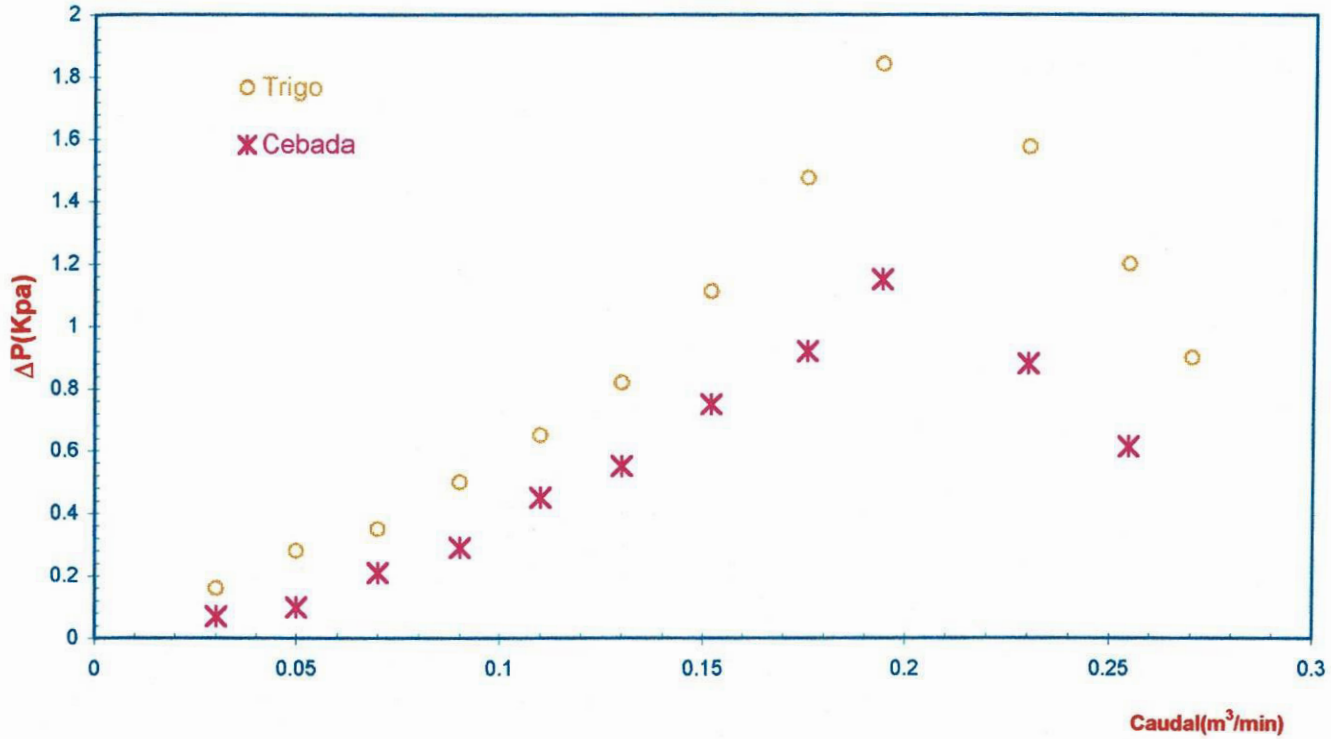
28.-M.H. EI-NAAS, S. ROGNON, R. LEGROS AND R.C. MAYER, "Hydrodynamics and Mass Transfer in a Spouted Bed Dryer", Drying Technology, pag.323 - 340, (2000).

ANEXO

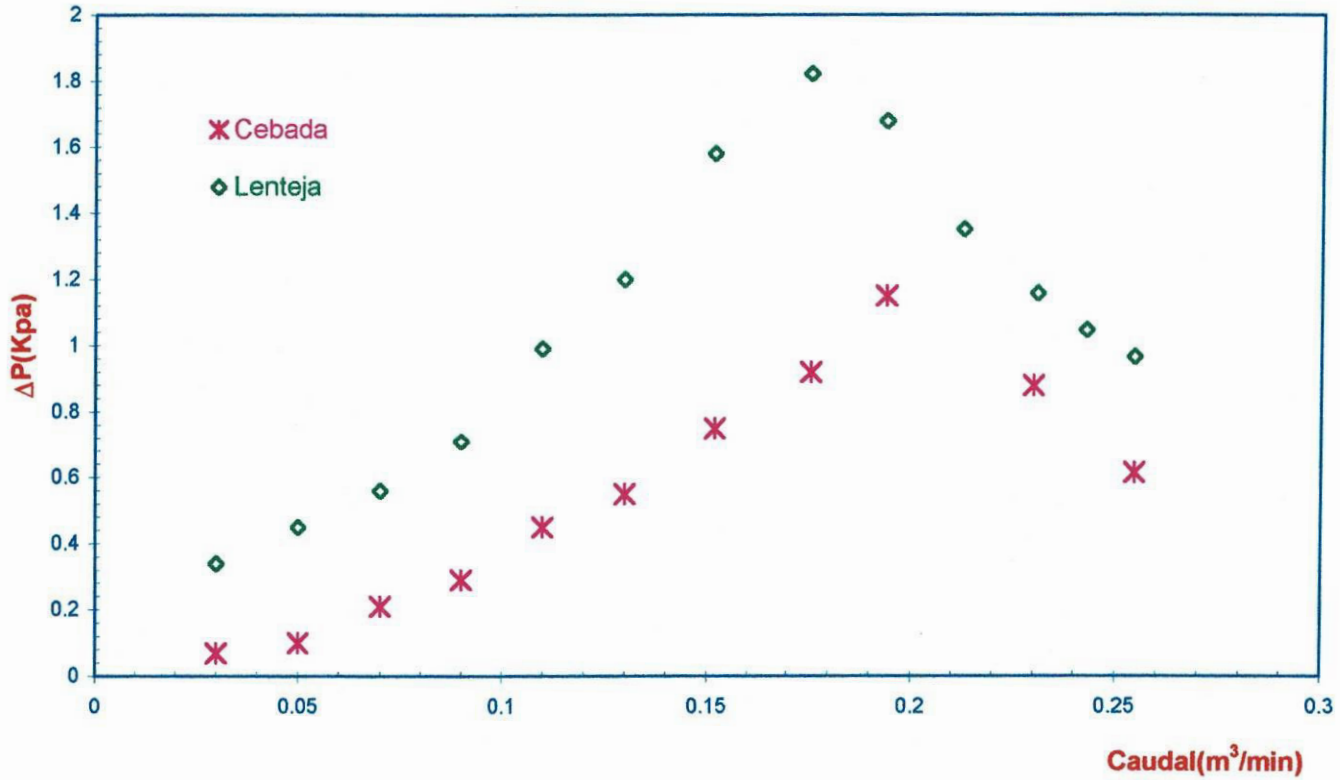
APÉNDICE I



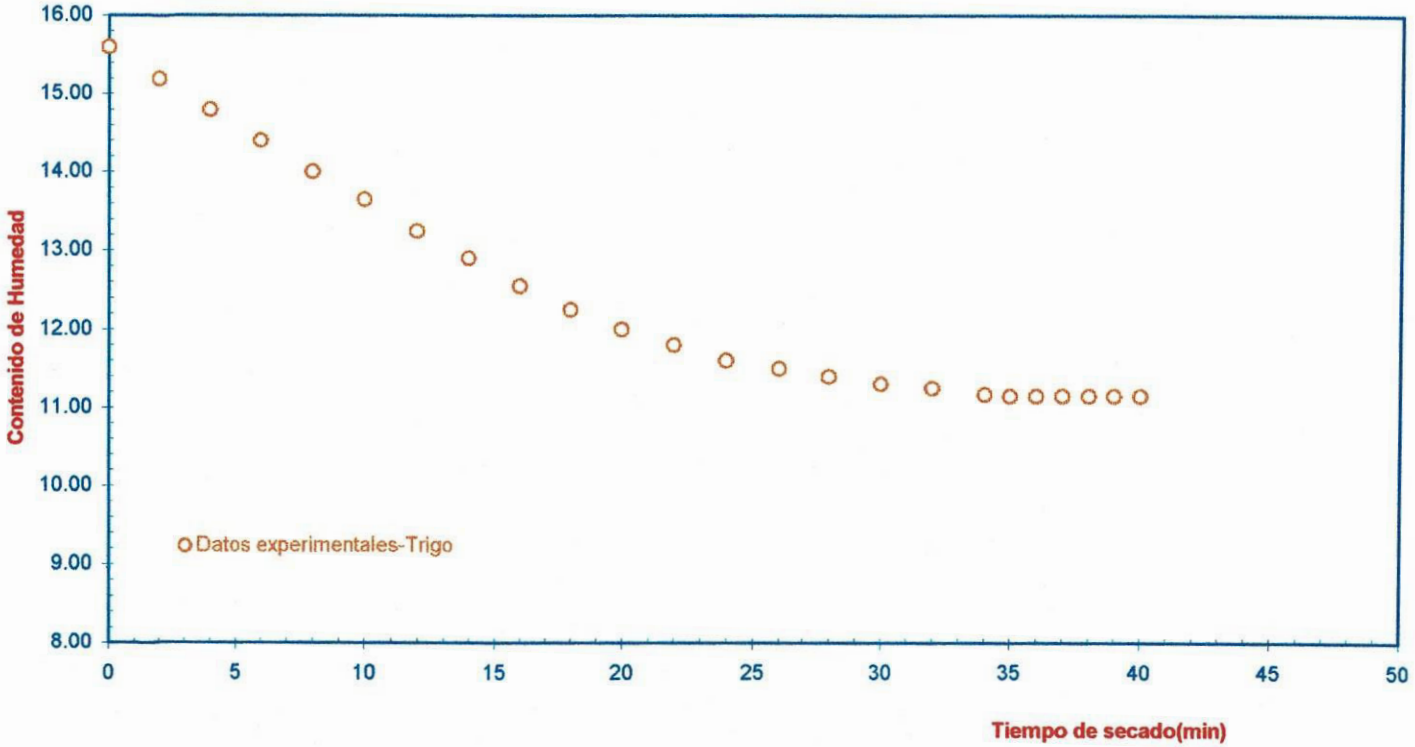
GRAFICA N°1 CURVA DE CALIBRACION-CORRIDAS EN VACIO



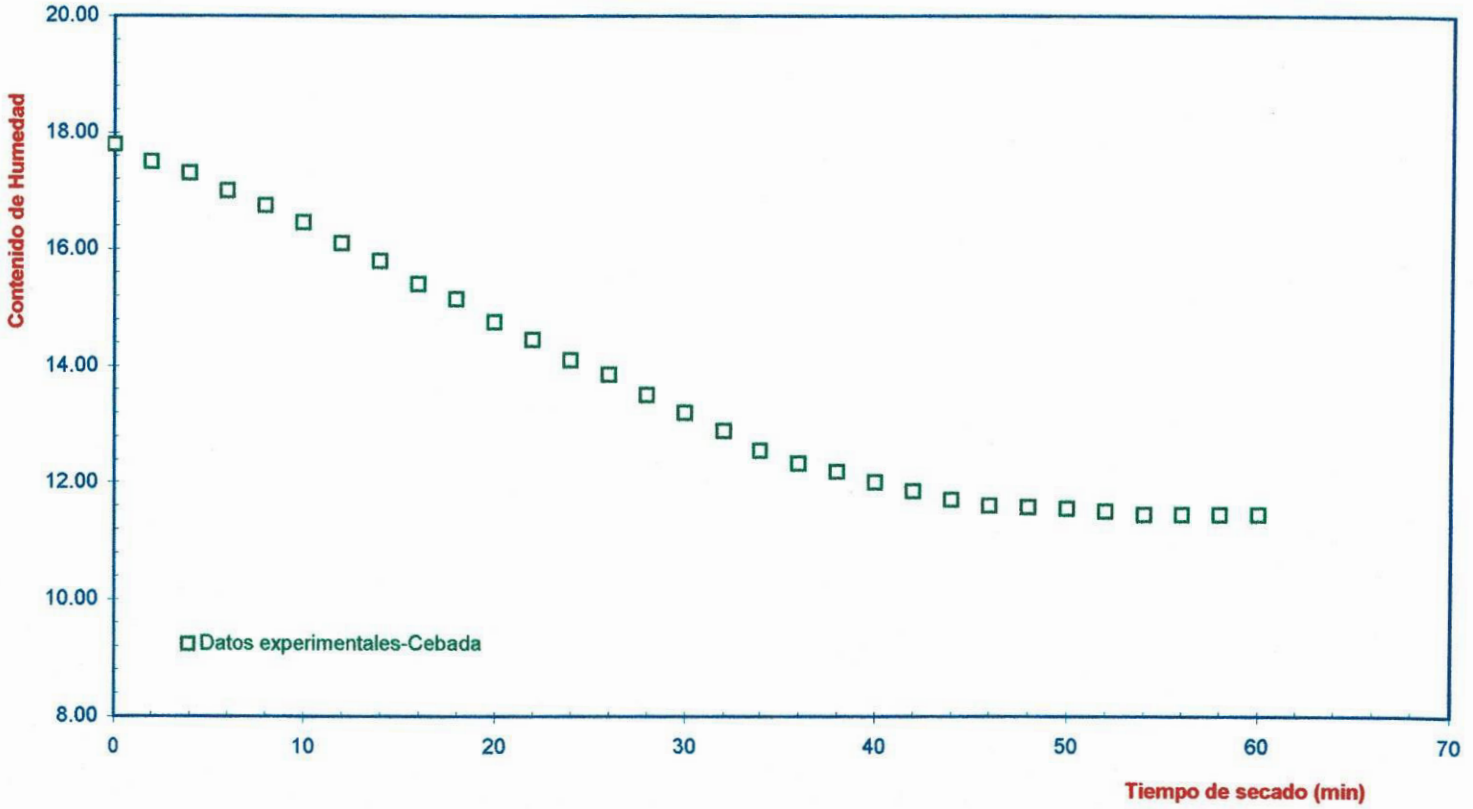
Gráfica N°2 Caída de presión vs caudal para el trigo y cebada a una misma altura de lecho(0.10m)



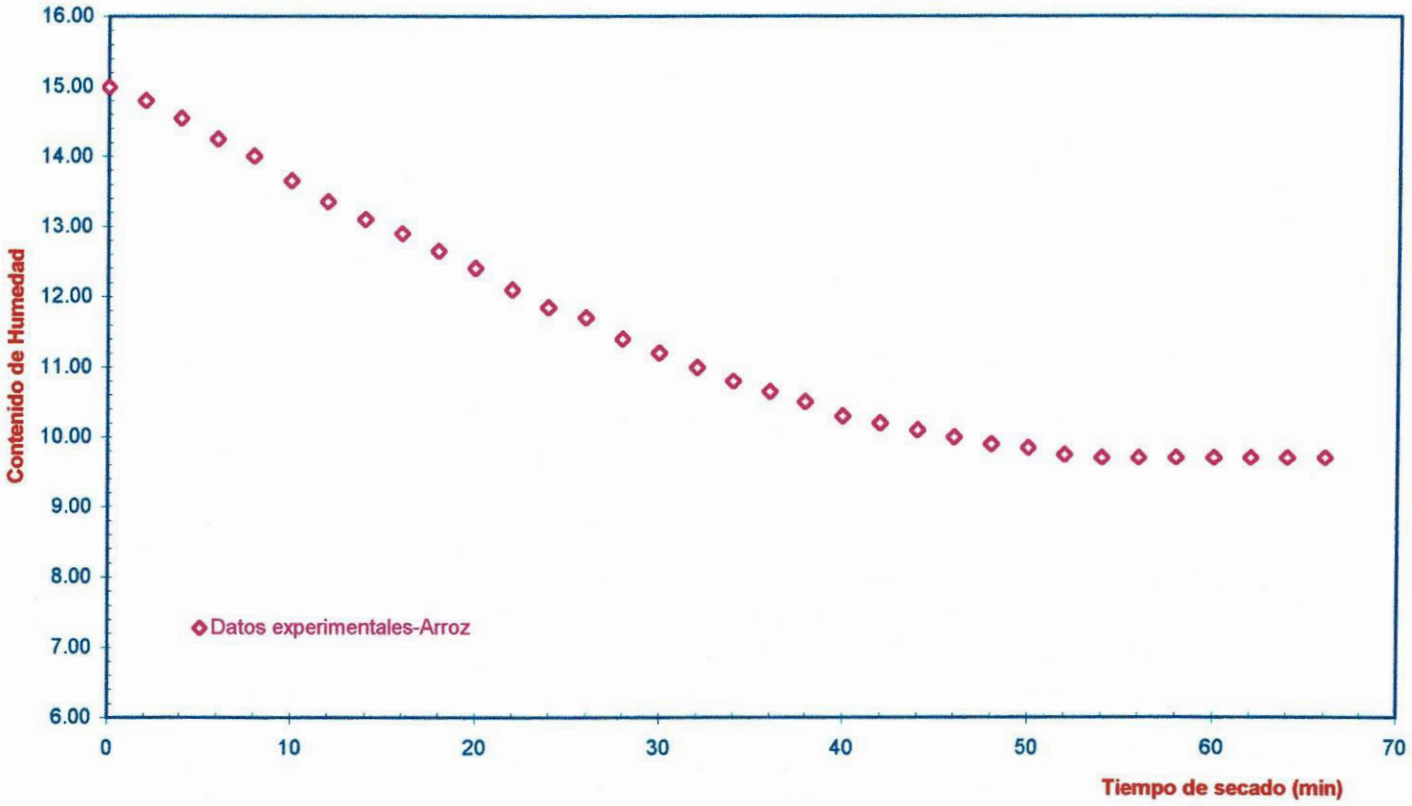
Gráfica N°3 Caída de Presión vs caudal para la cebada y la lenteja a una misma altura de lecho(0.10m)



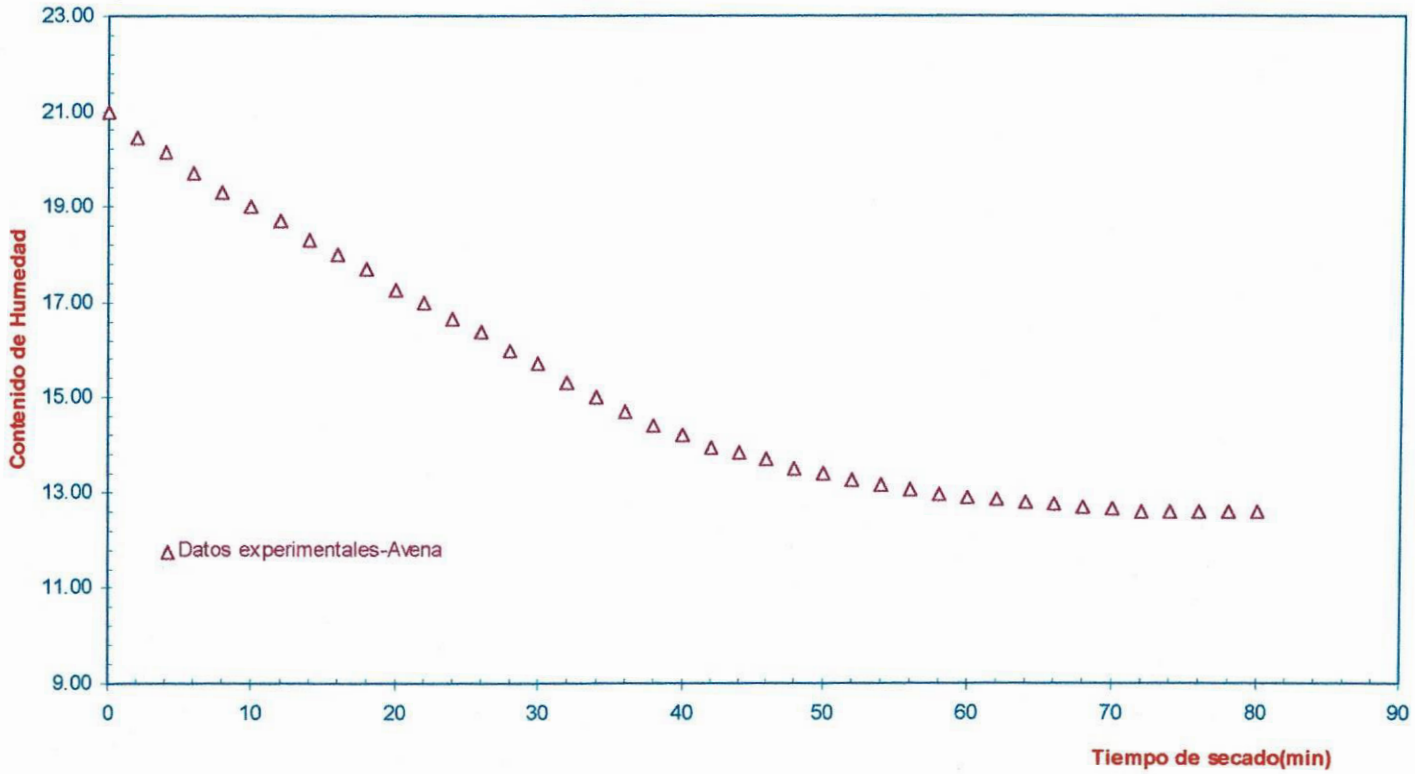
GRAFICA N°4 CURVA DE SECADO PARA EL TRIGO



GRAFICA N°5 CURVA DE SECADO PARA LA CEBADA



GRAFICA N°6 CURVA DE SECADO PARA EL ARROZ



GRAFICA N°7 CURVA DE SECADO PARA LA AVENA

APENDICEII

ESQUEMA DE LOS INSTRUMENTOS Y ACCESORIOS UTILIZADOS



Figura N°7 EQUIPO DETECTOR DE HUMEDAD ANALÓGICO MODELO G-6C-565-E,S/N,G8137 (MARCA DELMHORST INSTRUMENT CO.)



Figura N°8 BALANZA DE PRECISIÓN (MARCA ADAM EQUIPMENT AFP/L SERIES)

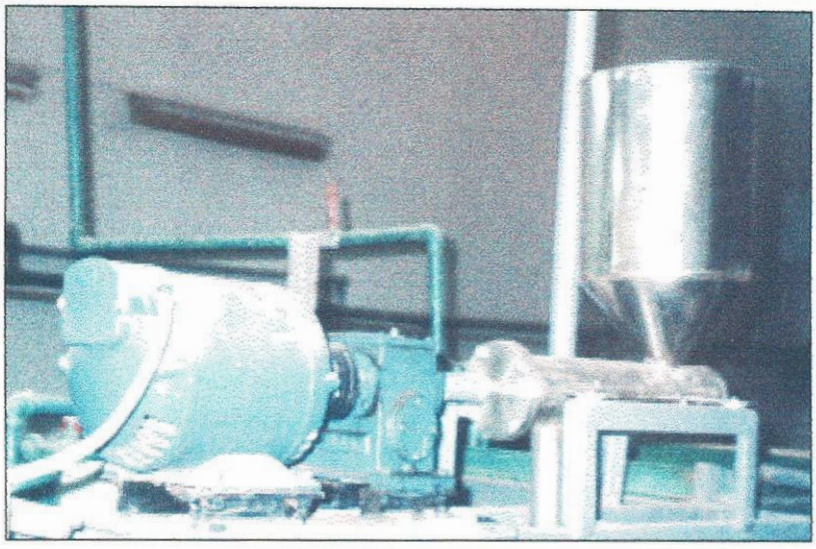


Figura N°9 BOMBA REDUCTORA Y TOLVA DE ALIMENTACIÓN DE LOS GRANOS DE CEREAL

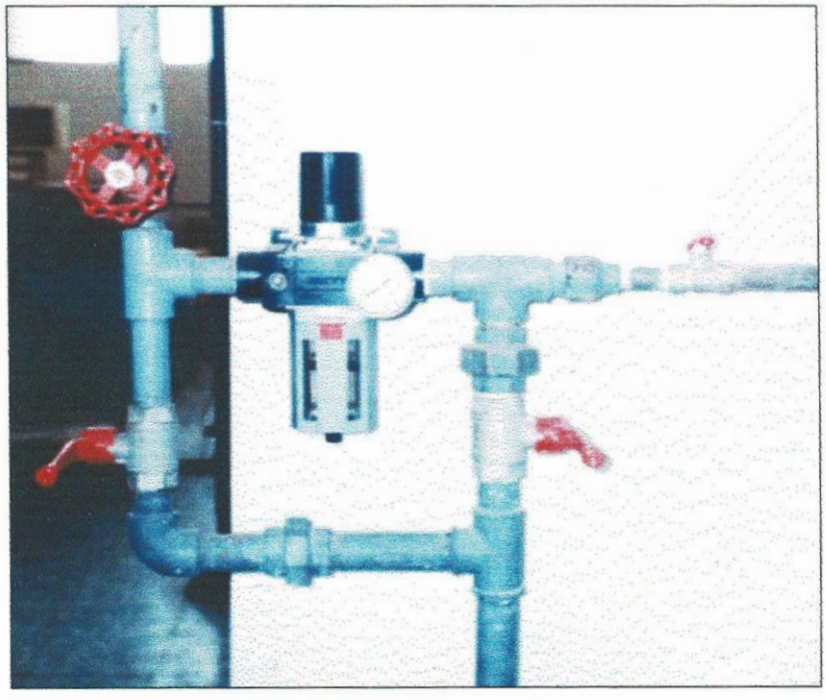


Figura N°10 REGULADOR DE PRESION DE AIRE (MARCA MICRO)

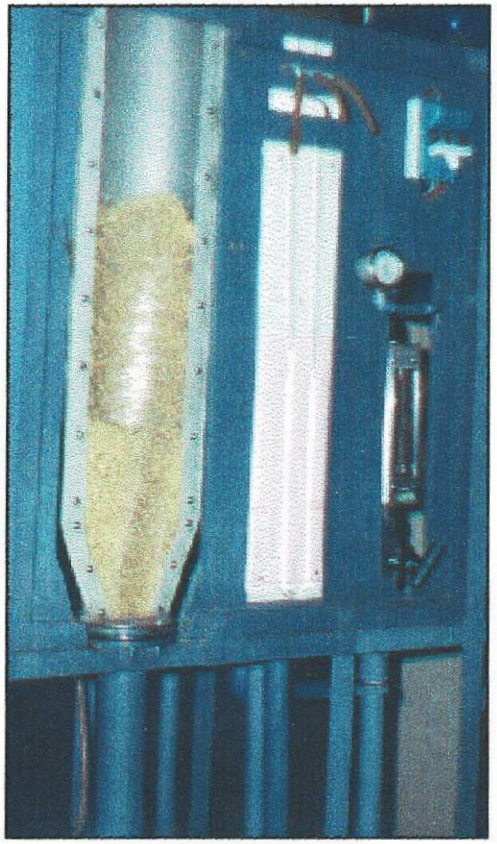


Figura N°11
EQUIPO CON FORMACIÓN DE LECHO SURTIDOR (SPOUTING) PARA DETERMINAR LA CAIDA DE PRESION

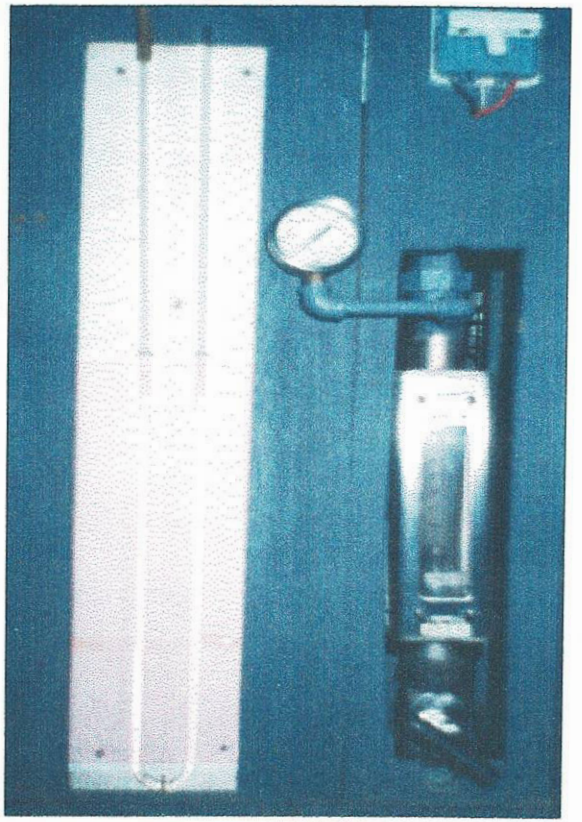
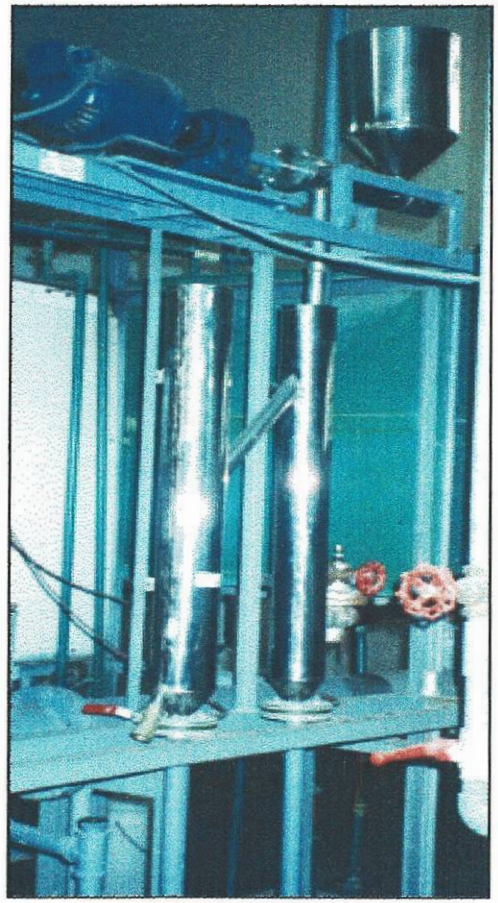


Figura N°12
APARATOS DE MEDICIÓN PARA DETERMINAR LA CAIDA DE PRESION MANÓMETRO EN U y ROTAMETRO



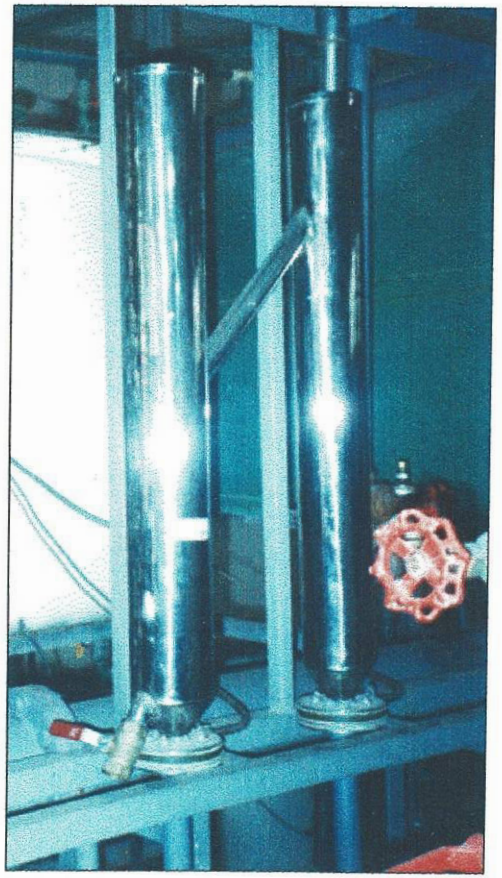


Figura N°13 EQUIPO DE SECADO EN SPOUTING BED (LECHO SURTIDOR)

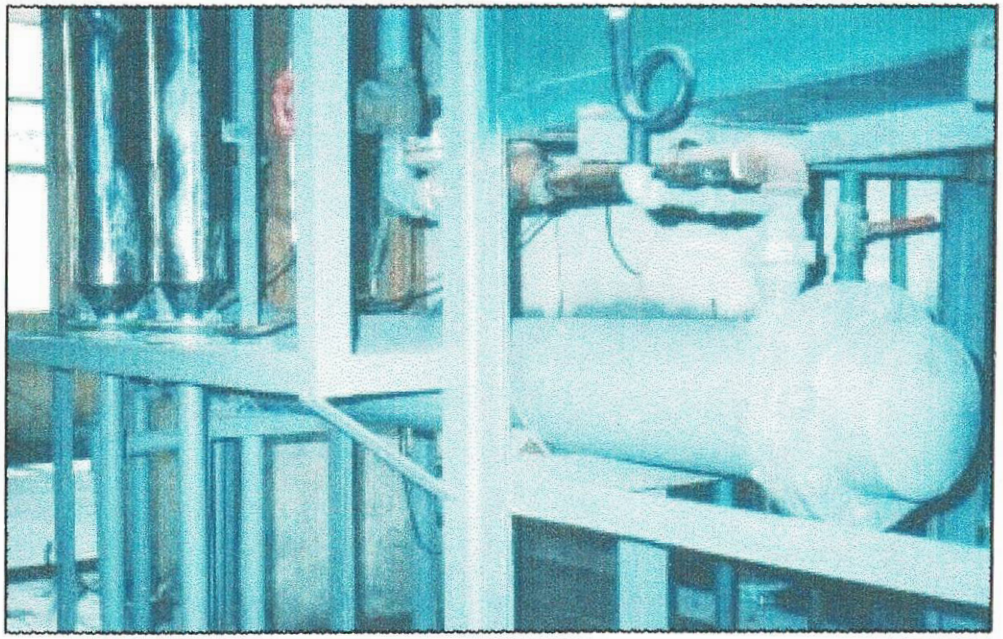


Figura N°14 INTERCAMBIADOR DE CALOR DE CORAZA Y TUBOS

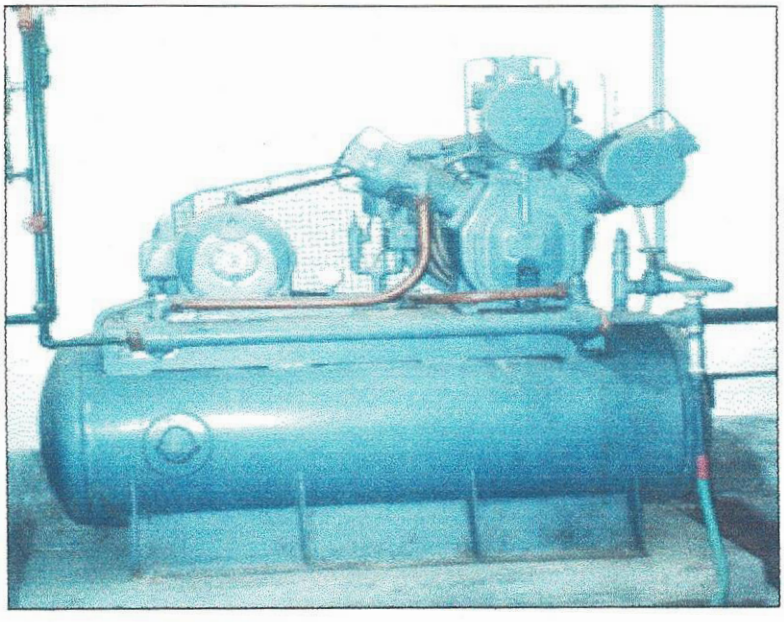
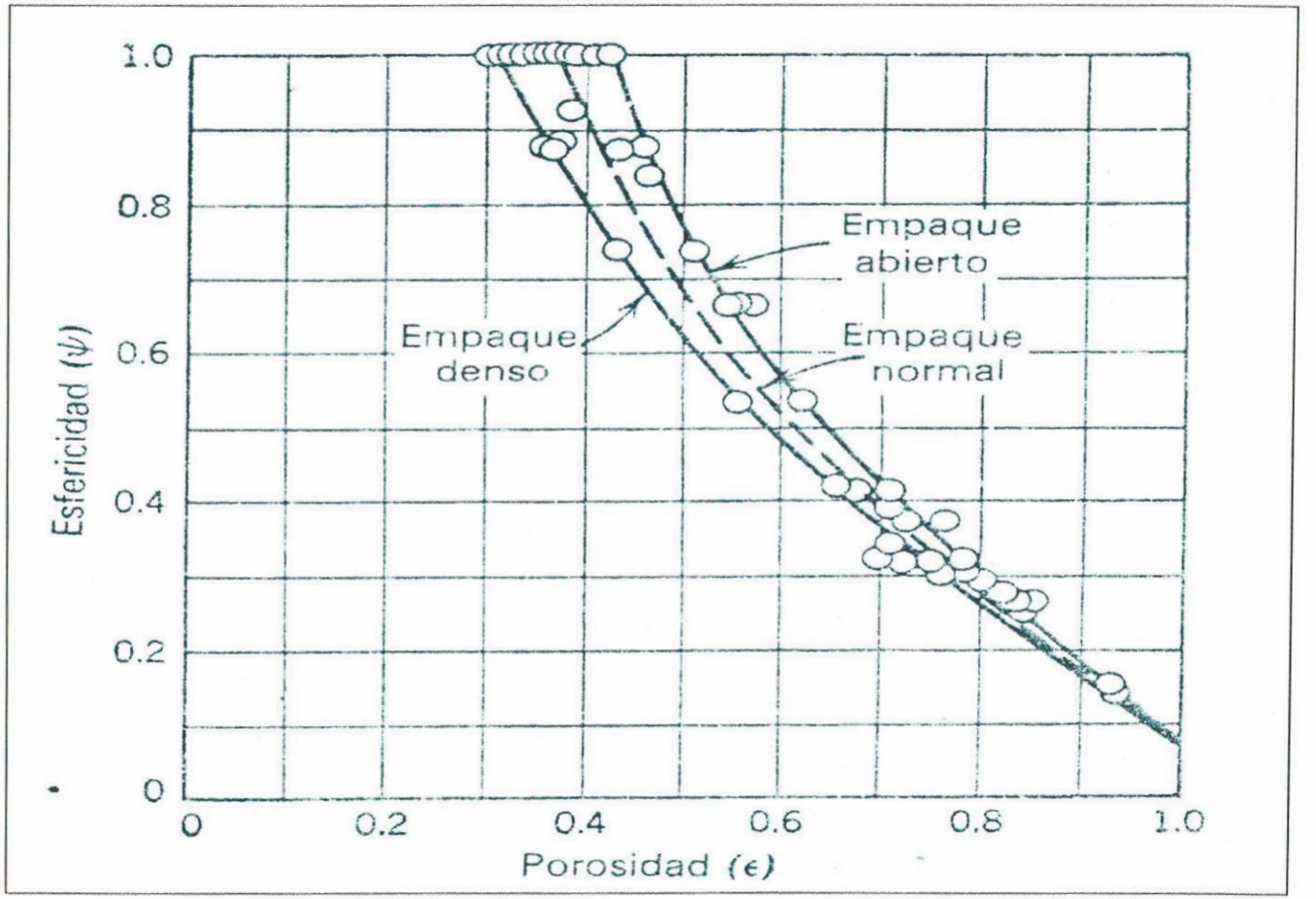


Figura N°15 COMPRESORA



Figura N°16 CALDERO

APENDICE III



Gráfica N°8: Esfericidad vs Porosidad