

Ingeniería

Revista Semestral de la Universidad de Costa Rica

ISSN 1409-2441

Vol. 17 (1)

Ene/Jul 2007

CONTENIDO

Artículos

1. Dimensionamiento y costeo de una planta de lavado de vehículos recolectores de desechos sólidos para los principales cantones del Área Metropolitana de Costa Rica 17-26
Ruiz, Francisco.
2. Caracterización de los registros acelerográficos obtenidos en el Laboratorio de Ingeniería Sísmica de la Universidad de Costa Rica..... 27-41
Schmidt, Víctor; Quirós, Christopher.
3. Optimización aplicada a la calibración y validación de modelos de elementos finitos de puentes 43-59
Rodríguez, Wilson; Muñoz, Edgar; Núñez, Federico.
4. Análisis mediante modelos físicos de interacción suelo-estructura en tuberías encerradas 61-76
Rodríguez, Jorge; Ruiz, Daniel; Coral, Álvaro; Pereira, Mauricio.
5. Pasta hidrotérmica y termoquímica a la soda obtenida a partir de residuos de paste (*Luffa cylindrica Roem*) 77-84
Blanco, María Lorena.
6. Diseño y construcción de un equipo de pruebas para la determinación de la resistencia al flujo de aire en granos y semillas..... 85-96
Aguilar, José Francisco.

Notas técnicas

1. Prototipo didáctico para la enseñanza de la Ingeniería Estructural 99-111
Muñoz, Edgar; Núñez, Federico; Otalora, Camilo.
2. Análisis de los factores que intervienen sobre la resistencia al flujo de aire en granos y semillas en operaciones de manejo poscosecha 113-124
Aguilar, José Francisco.

Trabajos de Graduación

Lista de proyectos de graduación de grado y posgrado del año 2006 de la Facultad de Ingeniería..... 127-140

Normas

Normas para la presentación de artículos a la Revista Ingeniería 143-150

EDITORIAL
UCR

EDITORIAL
UCR

Número (1)

Enero / Julio 2007

Volumen 17

REVISTA INGENIERÍA



DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO DE PRUEBAS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA AL FLUJO DE AIRE EN GRANOS Y SEMILLAS

José Francisco Aguilar Pereira

Resumen

El diseño del equipo de pruebas se basó en una serie de investigaciones realizadas en estudios similares, tomando en cuenta las normas para la toma de medición de varios parámetros requeridos en el estudio. El adecuado funcionamiento del equipo construido fue validado a través de pruebas preliminares, mediante las cuales se generaron curvas de resistencia al flujo de aire (RFA) cuyo comportamiento fue similar al de las curvas RFA encontradas en el estándar D212.1, de la Asociación Americana de Ingenieros Agrícolas (ASAE). Además, se diseñó una serie de pruebas con un producto tropical, la almendra de la palma aceitera (*Elaeis guineensis*), con el objetivo de verificar el correcto funcionamiento del equipo y definir el procedimiento y consideraciones específicas para realizar pruebas con otros granos de interés comercial.

Las pruebas preliminares permitieron validar el comportamiento y uso del equipo. Por otro lado, se definió una metodología que permitirá investigar y generar de una manera sencilla y clara curvas de RFA.

Palabras clave: granos, semillas, ingeniería en procesamiento agrícola, sistemas de secado, sistemas de aireación, resistencia al flujo de aire.

Abstract

The equipment was designed based on a series of investigations on similar studies keeping considerations into the measurement regulations on several parameters required for resistance to airflow analysis through grain and seeds. Once that equipment was built, preliminary tests were carried out verifying its behaviour for similarity on empirical curves of resistance to the air flow, which are well-known in the standard ASAE D212.1, of the American Association of Agricultural Engineers (ASAE). A series of tests was also designed with oil palm kernels (*Elaeis guineensis*), a tropical grain, verifying the correct operation of the equipment and to define procedures and specific considerations for tests with other types of grains.

The preliminary tests allowed to validate the behaviour and use of the equipment. On the other hand, these tests defined a methodology that will allow researchers, in a simple way, to generate curves of resistance to the air flow, with the advantage of flexibility concerning on particular geometry condition in order to study the airflow resistance.

Key words: grains, seeds, food engineering, drying system, aeration system, resistance to the air flow.

Recibido: 13 de abril del 2007 • **Aprobado:** 09 de julio del 2007

1. INTRODUCCIÓN

Muchos de los productos agrícolas, especialmente granos y semillas, son secados para procesarlos o para preservarlos, haciéndoles pasar un flujo de aire a través de ellos. El aire, al moverse a través de una masa granular, encuentra una resistencia al movimiento que le produce una pérdida de energía y una reducción en su presión

estática. El conocimiento de este fenómeno y la disponibilidad de la información sobre resistencia al flujo de aire (RFA) producida por diversos granos, es de vital importancia en el diseño de sistemas apropiados de secado y aireación.

Para establecer cuál es la RFA en el sistema, una primera fase en el diseño es la elección de un flujo de aire adecuado. Dalpasquale, Marcal

de Queiroz, Marques, y Sinicio (1991) presentan casos de secado a bajas temperaturas, se tiene dos premisas: la primera es que si el flujo de aire es inferior al valor adecuado, hay demora en el secado y se puede comprometer la calidad del producto; la segunda es que si el flujo de aire es superior al valor adecuado, si bien disminuye el tiempo de secado, aumenta el consumo de energía para accionar el ventilador y aumenta, por tanto, el costo operativo del sistema, además de exigir una mayor inversión inicial. Es por esto que los flujos de aire recomendados para el secado, que también se conocen como flujos mínimos de aire, se expresan normalmente en función de la unidad de volumen del producto. El flujo mínimo de aire depende de los siguientes factores: tipo de producto, clima de la región y contenido de humedad inicial.

Cada tipo de grano está asociado a susceptibilidades en mayor o menor medida, en relación con otros, debido a su composición química y a la facilidad que tienen los hongos para penetrar en su interior en busca de alimento para sobrevivir, por ejemplo, las necesidades de aire para secar el arroz son diferentes de las necesidades del maíz. La influencia del clima de la región determina el potencial de secado: en regiones donde hay grandes probabilidades de que ocurran períodos prolongados de elevada humedad relativa, durante la época de secado, se necesita un flujo de aire mayor, o bien, calentamiento suplementario, o ambas cosas, por el mayor riesgo del proceso. El contenido de humedad inicial también es un factor que determina el flujo mínimo, pues está directamente relacionado con la susceptibilidad del producto al ataque de hongos. Los granos que tienen un alto contenido de humedad son atacados con más facilidad por los hongos, por lo que están más expuestos al deterioro. Así, los productos cuyo contenido de humedad inicial es alto necesitan un flujo de aire más intenso.

Aguilar (1993) muestra que en el análisis del comportamiento de la resistencia al flujo de aire (RFA) en granos y semillas, es necesario caracterizar la geometría del producto a procesar, por ejemplo, según el tipo de grano o semilla se

debe considerar la granulometría, donde ésta puede ser alterada en la línea de proceso, incidiendo de manera significativa en los requerimientos de energía mecánica que el ventilador tiene que transferir al aire, para vencer la resistencia que ofrecen los granos. Esta caracterización geométrica implica aspectos como: tamaño y forma, grado de limpieza del grano, rugosidad de grano, densidad aparente, espacio poroso y contenido de humedad. Estos aspectos varían según el tipo de producto y aunado a ellos, los procesos pueden incidir en la RFA, como por ejemplo: forma de llenado, dirección del flujo, orientación del grano y régimen de flujo. Todos estos aspectos fueron analizados por diferentes investigadores como Agrawal y Chand (1974), Wilhelm, Tompkins, y Mullins (1983), Calderwood (1973), Sokkansanj, Falacinski, Sosulski, Jayas, y Tang, (1990), Matthies y Petersen (1974), Steele (1974), Ashwini y Muir, (1986), Yang y Williams (1990), Akritidis y Siatras (1979), entre otros.

Muchos de estos trabajos son tomados en cuenta y son publicados en las normas de la Asociación Americana de Ingenieros Agrícolas (ASAE) D212.1, dichos trabajos corresponden a granos y semillas de importancia comercial que se producen en países desarrollados y de zonas templadas. Por lo que las condiciones con que se manejan estos granos y las condiciones particulares en que se llevaron a cabo las pruebas, son limitaciones que se deben tener presentes si se van a tomar como referencia para productos de zonas tropicales (Aguilar, 1993). Por esto, estudios como el presente vienen a llenar estas limitaciones en productos tropicales de importancia comercial, tal es el caso del coquito (semilla del fruto) de la palma aceitera (*Elaeis guineensis*) también conocida como almendra de la palma aceitera, café (*Coffea arabica*), maní (*Arachis hypogaea*), maíz (*Zea mays*), arroz (*Oryza sativa*), etc. Este trabajo muestra los detalles de diseño y construcción del equipo de pruebas para medir la RFA, donde se verifica y valida su comportamiento en cuanto a sus resultados. Dicho equipo tiene la gran ventaja de valorar el comportamiento de la RFA tomando en cuenta las condiciones particulares con que se maneja el grano; por último, se define una guía general metodológica para la realización de pruebas en proyectos futuros con otros productos.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Diseño y construcción de equipo de pruebas

Una de las fuentes de investigación más valiosa fue la que se tomó de los artículos científicos de la ASAE donde la investigación en la RFA a través de granos y semillas, es amplia. En dichos artículos se brinda información acerca de los equipos de prueba utilizados y algunos criterios de diseño, que permitieron dar una guía de la posible forma del equipo por implementar en el proyecto, de acuerdo con los recursos disponibles.

Los trabajos de investigación que se emplearon como fuente para poder concretar el equipo de pruebas fueron los de Agrawal y Prem (1974), Akritidis y Siatras (1979), Ashwini y Muir (1986), Calderwood (1973), Matthies y Petersen (1974), Okkansanj, Falacinski, Sosulski, Jayas y Tang (1990), Steele, Wihelm, Tompkins y Mullins (1983), Yang y Willians (1990).

Por otro lado, las consideraciones de diseño en los artículos, en cuanto a las regulaciones de caudal y la toma de presiones, fueron de vital importancia, pues los parámetros de caudal y presión son los que se manejan para obtener las curvas de resistencia al flujo de aire (RFA).

El objetivo del equipo diseñado es permitir cuantificar la caída de presión estática en una capa de grano para un caudal específico aplicado (Q_a), donde este se cuantifica determinando la razón de caudal aplicada entre el área de la base del piso perforado. Con base en esta premisa y a las investigaciones realizadas, el equipo de pruebas consta de las siguientes partes:

2.1.1 Ventilador

El ventilador utilizado es de 1/10 hp, 110 V y una frecuencia de 60 Hz, el cual brinda el ámbito de caudales específicos (Q_a) requeridos aplicado a la capa de grano al cual se le va a medir su RFA.

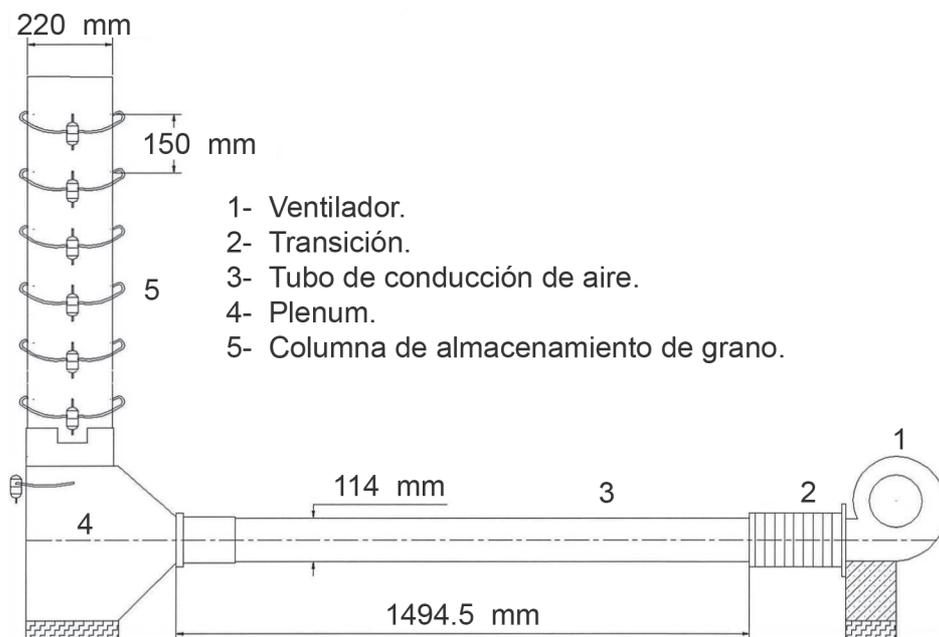


Figura 1. Partes principales del equipo de pruebas para la determinación de la resistencia al flujo de aire (RFA) a través de granos y semillas.

Fuente: (El autor).

Los diferentes caudales específicos (Q_a) requeridos se pueden lograr controlando la velocidad de rotación del ventilador, esto es posible cambiando el voltaje de entrada al motor mediante el uso de un autotransformador de voltaje. Así, si se desea un Q_a , se fija un voltaje de entrada de manera que modifique la velocidad de rotación del ventilador y se aproxime al Q_a deseado (Figura 2).

El autotransformador de voltaje, que se opera durante periodos cortos de tiempo, es del tipo 2FP 1010 (120 V-140 V), de una entrada de 120 V, 10 A, salida de 0 V a 120 V, potencia aparente 1,4 kVA y una frecuencia de 50/60 Hz.

2.1.2 Pieza de transición

La pieza de transición está hecha de madera y tiene como fin disminuir la turbulencia producida por cambios bruscos en la sección transversal del ducto, en este caso de una sección rectangular de la salida del ventilador, a una circular del tubo de conducción de aire.

En la construcción de la transición se consideró que el ángulo máximo en el cambio de las dos secciones es de 7° , según la Sociedad Americana de Ingenieros en Aire acondicionado y Refrigeración (ASHRAE, 1992). En la Figura 3 se muestran las vistas de dicha sección.

2.1.3 Tubo de conducción de aire

Este es un tubo de PVC, con un diámetro interno de 0,114 m y un largo de 1,51 m. En este tubo es donde se mide el caudal aplicado (Q), el cual se obtiene del producto de la velocidad promedio, a partir del perfil de velocidad (en una sección del tubo), por el área transversal del tubo.

La velocidad se tomó a 1,2 m a partir de la pieza de transición, donde la distribución de velocidad es prácticamente uniforme. Según la Sociedad Americana de Ingenieros en Aire acondicionado y Refrigeración (ASHRAE, 1992), las mediciones deben hacerse a una

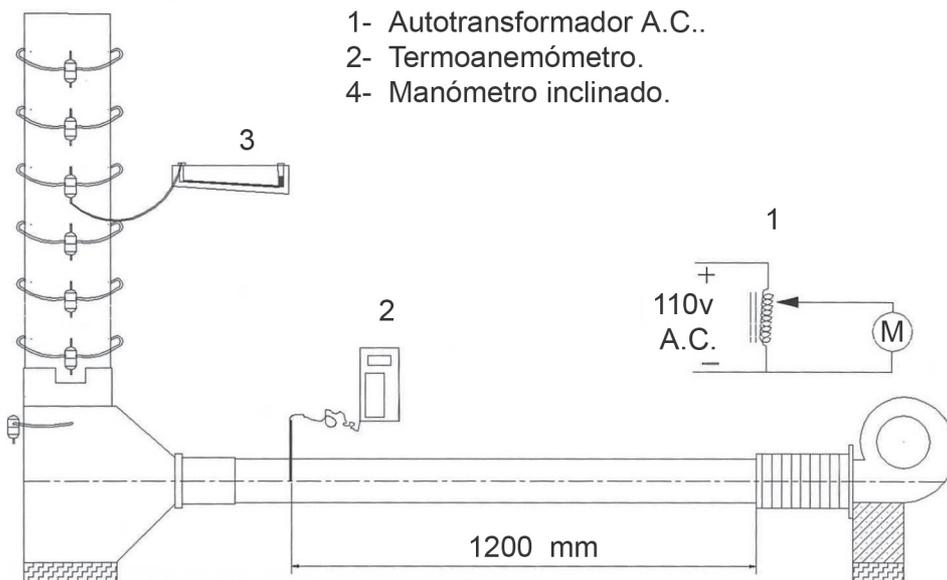


Figura 2. Localización de instrumentos de medición y de regulación en el equipo de pruebas de RFA.
Fuente: (El autor).

distancia no menor de 7,5 veces del diámetro del tubo de conducción, o sea a 0,825 m, por lo que esta medición de 1,2 m está dentro de la recomendación (Figura 2).

2.1.4 Plenum

El plenum asegura que la entrada a la columna de grano sea un flujo uniforme y convierte parte de la energía cinética del flujo en presión estática adicional, pero a un costo de cierta ineficiencia.

El material que se utilizó para su construcción fue de acero No.16. En la parte superior del plenum se tiene acoplado un anillo de acero inoxidable de 0,20 m de diámetro (Figura 3), donde este anillo tiene una malla cuadrada con orificios cuadrados de 2 mm de ancho, que sirve como piso falso y tiene un área perforada de 48 %; además, este anillo se acopla con la columna de almacenamiento de grano de PVC (Figura 4). En estas uniones se encuentra un empaque de hule que hermetiza el sistema y evita así las fugas de aire.

2.1.5 Columna de almacenamiento de grano

Es un tubo de PVC de 0,22 m de diámetro externo, de 5 mm de espesor y 1 m de alto, montado sobre el anillo de acero inoxidable mencionado anteriormente, el cual, a su vez, conecta con el plenum.

En este tubo se coloca el material experimental para las pruebas para medir la RFA interpretada a partir de la caída de presión. Para la medición de la presión estática se hicieron tres perforaciones de 3,18 mm de diámetro, perpendiculares al tubo de PVC, en un mismo plano y nivel de altura separados a 120° (Figura 3). Estas tres perforaciones se realizaron a incrementos en altura de 0,15 m a partir del piso falso.

El objetivo de las tres perforaciones es tomar tres datos de presión a un mismo nivel y promediarlos físicamente. Este promedio se logra mediante la construcción de una cámara pequeña con aire (Figura 3), en la cual las tres presiones estáticas se equilibran. La salida, es entonces, la presión media resultante de las tres que entraron.

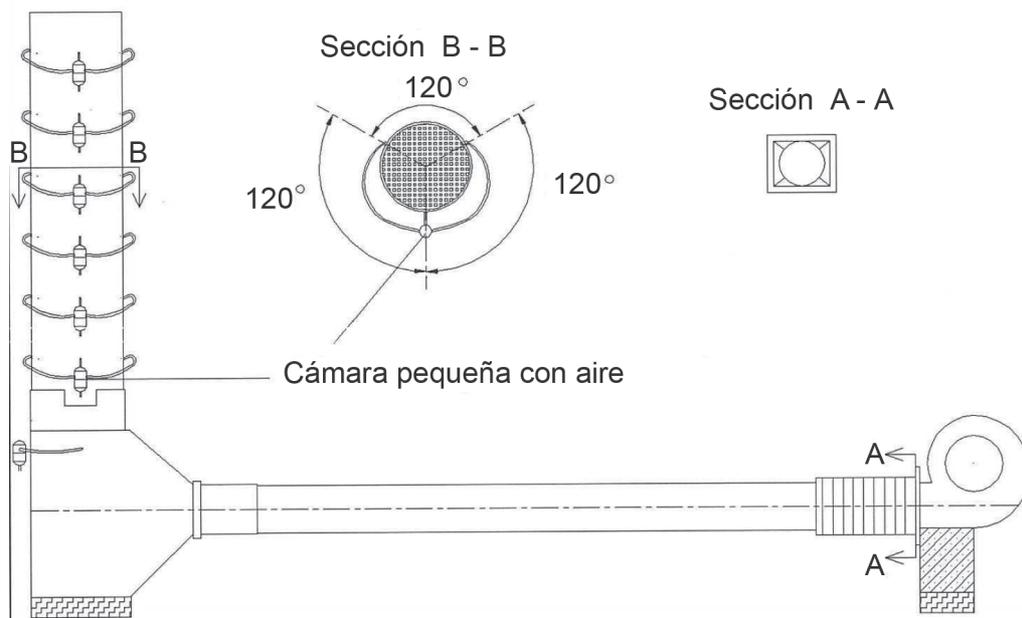


Figura 3. Vistas de equipo de pruebas en la transición y detalle de columna y piso perforado.

Fuente: (El autor).

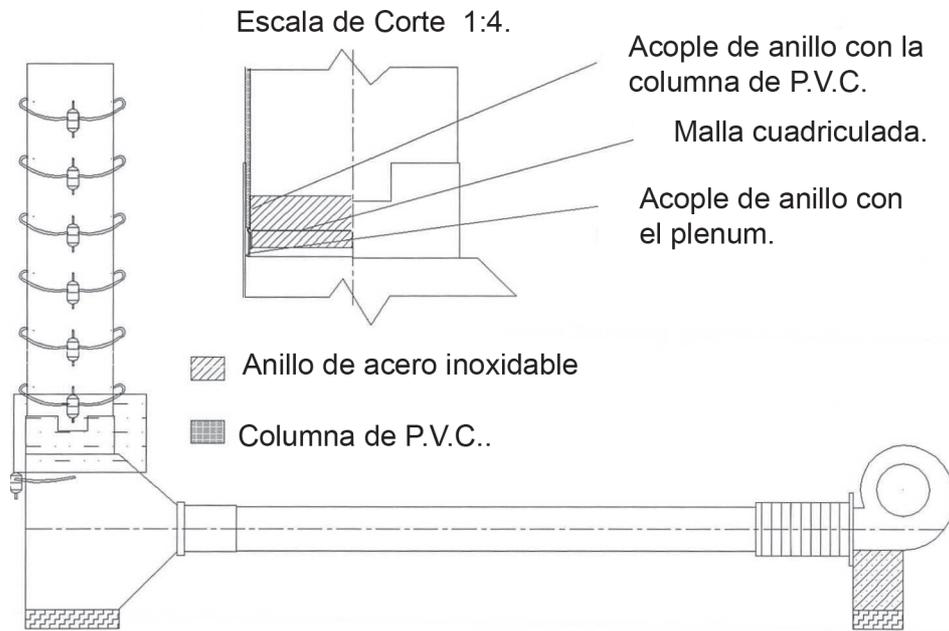


Figura 4. Detalle de acoples del *Plenum* con la columna.

Fuente: (El autor).

La cámara pequeña con aire, de material de PVC, consiste de dos tapones de 12,7 mm, unidos con un trozo de 0,03 m de largo de tubo y sellados con cemento plástico; luego, se hicieron tres perforaciones de 3,18 mm de diámetro en el tapón superior (tres presiones de entrada) y una cuarta perforación de igual diámetro en el tapón inferior (presión de salida que es la media y resultante).

En cada perforación se acopló un tubo de 3,17 mm de diámetro de cobre con rosca de 20 mm de largo. Este tubo de cobre sirve de acople con las mangueras para la transmisión de las presiones. Con el propósito de evitar las fugas de aire, cuando se instalaron los tubos de cobre se le colocó pasta de silicón en todas las roscas.

Los tubos de cobre se colocaron con el cuidado de que estos no sobrepasaran la superficie interior del tubo de almacenamiento y así evitar posibles efectos de turbulencias en el paso de aire en la superficie.

2.1.6 Características del grano utilizado

El grano utilizado tiene las siguientes condiciones: limpio y entero, con un diámetro nominal de 10 mm, donde la densidad aparente promedio medida con la columna de almacenamiento fue de 635,8 kg/m³ (desviación 3,5 kg/m³) y con un contenido de humedad de 5 %.

3. PRUEBAS PRELIMINARES

Una vez que el equipo de pruebas fue construido, se realizaron las pruebas bajo los siguientes objetivos:

- Verificar el correcto funcionamiento del equipo de pruebas mediante procedimiento general.
- Definir el procedimiento y consideraciones específicas para las pruebas en granos, tomando como base el grano de coquito de palma aceitera.

- c. Seleccionar los instrumentos de medición requeridos para los ámbitos de trabajo (caudal y presión estática).

3.1 Procedimiento general de pruebas preliminares

El procedimiento general que se utilizó en estas pruebas preliminares fue el siguiente:

1. Definir los ámbitos de trabajo, en cuanto a caudales y presiones, con el fin de establecer el equipo de medición apropiado. Como referencia inicial aproximada se utilizaron las curvas empíricas de RFA a través de granos y semillas del ASAE (1984), tomando como referencia productos agrícolas con características físicas (tamaño y forma) similares al coquito de palma aceitera.
2. Efectuar pruebas de RFA a diferentes capas fijas de coquito de 0,15 m a 1 m, para determinar si existía algún fenómeno que pudiera alterar la curva de RFA para las diferentes capas de grano, y así decidir cuál sería el espesor de la capa de grano que se puede recomendar en un grano similar. Con el objeto de observar la RFA en cada prueba, se midió la caída de presión a lo alto de la columna de grano y en el plenum, para un caudal definido; luego, se varió el caudal y se procedió de la misma forma para las mediciones de presión.
3. Con base en las pruebas anteriormente señaladas, se pudo obtener las curvas preliminares de RFA a través de una capa de grano de coquito. Esta curva permitió redefinir los ámbitos de trabajo (caudal y presión) y por otro lado, verificar si la curva generada estaba dentro de los ámbitos esperados, según las curvas empíricas de RFA de la ASAE para otros productos de características físicas similares.
4. Comprobar si realmente el piso falso brinda alguna resistencia adicional al paso del aire. Según la ASAE (1982), en un piso falso con un área perforada mayor del 10 %, la caída de

presión estática es muy pequeña, comparada con la caída dentro de la masa de grano y por lo tanto, puede despreciarse.

5. Como método de comprobación de la operación del equipo, generar una curva de RFA para arroz en granza para un espesor de 0,30 m, con el fin de observar si se aproxima a la curva de la ASAE.
6. Establecer, de acuerdo con el análisis de las pruebas preliminares, una metodología adecuada para las pruebas en granos en trabajos similares.

3.2 Definición de parámetros de trabajo en pruebas preliminares

El ámbito de los caudales específicos que se pretende estudiar es de (0,01 a 0,3) $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}^2$ en las unidades del Sistema Internacional (SI). Estos caudales específicos se definen de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$Qa = \frac{Q}{Ap} \quad (1)$$

donde:

Qa = caudal específico por unidad de área de piso falso, $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}^2$.

Q = caudal aplicado a la columna de grano, m^3/s .

Ap = área de piso falso, m^2 .

El caudal aplicado a la columna de grano (Q), se obtiene de la siguiente forma:

$$Q = A_d \cdot V \quad (2)$$

donde:

A_d = área de ducto de conducción, m².

V = velocidad promedio, m/s.

Relacionando estas fórmulas, la velocidad quedaría definida como:

$$V = \frac{Q_a \cdot A_p}{A_d} \quad (3)$$

dados A_p y A_d , se tiene que el ámbito de velocidades para los caudales específicos citados es de 0,04 m/s a 1,12 m/s.

En cuanto a la caída de presión estática por unidad de espesor de grano, se puede estimar de acuerdo con las características físicas del coquito en relación con los productos de características similares que presenta la ASAE en las curvas empíricas de RFA. Esta curva de caída de presión se encuentra aproximadamente entre las curvas de maní (*Arachis hypogaea*) en cáscara (Penauts in shell) con un 4,4 % de contenido de humedad y la curva de guisantes (Pea Beans) a un 15 % de contenido de humedad. En términos numéricos, el caudal y la caída de presión varían de 0,036 m³/s m² y 2,45 Pa/m a 0,4064 m³/s/m² y 653,12 Pa/m.

3.3 Selección de instrumentos de medición para pruebas preliminares

Con el análisis anterior, los instrumentos de medición que se utilizaron fueron:

- Para la medición de las presiones estáticas se utilizó un manómetro inclinado que se usa frecuentemente para la medición de pequeñas diferencias en presiones de gas.

El manómetro inclinado requiere un mayor desplazamiento de los meniscos que un tubo vertical para una diferencia de presiones dada, por lo tanto, ofrece una mayor exactitud en la lectura de la escala.

El manómetro inclinado utilizado tiene las siguientes características:

- Marca Dwyer, Controls gages. Michigan City Ind.

- Utiliza líquido meriam de 0,826 de densidad relativa.

- La lectura máxima de columna es de 25,4 mm de agua.

- La lectura mínima de columna es de 0,254 mm de agua.

- Para la medición de velocidad se utilizó un anemómetro de “alambre caliente”, que funciona según el principio de que la resistencia al flujo de electricidad que pasa por un alambre fino de platino es una función del enfriamiento, debido al flujo de gas que hay alrededor.

El anemómetro utilizado mide también la temperatura denominándose termoanemómetro y tiene las siguientes características:

- Marca Alnor, Cole-Parmer Instruments Company.

- Especificaciones de velocidad del aire: ámbito: 0,1 m/s a 10 m/s .

- Resolución: 0,01m/s a partir de 0,1 a 3,05 m/s; 0,1 m/s a partir de 3,1 a 10,2 m/s.

3.4 Procedimiento específico generado tomando como base el coquito de la palma aceitera

El procedimiento utilizado para la toma de datos en las pruebas preliminares, a diferentes capas fijas, se describe a continuación:

- Se llena la columna de PVC (Figura 1), hasta una altura predefinida, ya sea de (0,15 , 0,3 , 0,45 , 0,60 , 0,75 , 1) m.

- En el proceso de llenado, se nivela a capas de 0,15 m con el propósito de uniformizar la altura de la capa y la densidad aparente para cada prueba.

- c. Se verifican las conexiones del ventilador como el tubo de conducción, del tubo de conducción con el plenum y de este último con la columna de PVC (Figura 4).
- d. Se arranca el sistema motor y ventilador.
- e. Se fija la velocidad de rotación del ventilador para obtener el caudal específico (Q_a) requerido. Esto se logra cambiando el voltaje de entrada al motor mediante el uso de un autotransformador.
- f. Se mide la velocidad a diferentes profundidades en el ducto de conducción y se obtiene una velocidad promedio; es importante mencionar que conociendo esta velocidad promedio y las áreas respectivas, se puede determinar el caudal aplicado (Q) y el caudal específico (Q_a).
- g. Se mide la presión estática a lo alto de la columna de granos, y en el plenum.
- h. Se obtiene un promedio de las caídas de presión en $\text{mm H}_2\text{O}$ cada 0,15 m de espesor de capa de grano y luego estas caídas se transforman a unidades convencionales de Pa/m .
- i. Se repiten los pasos e) al h) para diferentes velocidades de rotación para una capa, hasta cumplir con el ámbito de caudales específicos deseados. Una vez completado el ámbito de caudales, se repite del paso a) al h) para cada altura de capa predefinida.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Evaluación general preliminar del equipo

Los datos de velocidad (V), caudal (Q), caudal específico (Q_a) y presión estática para diferentes capas fijas, fueron evaluadas en las pruebas preliminares. Con base en esta información, se

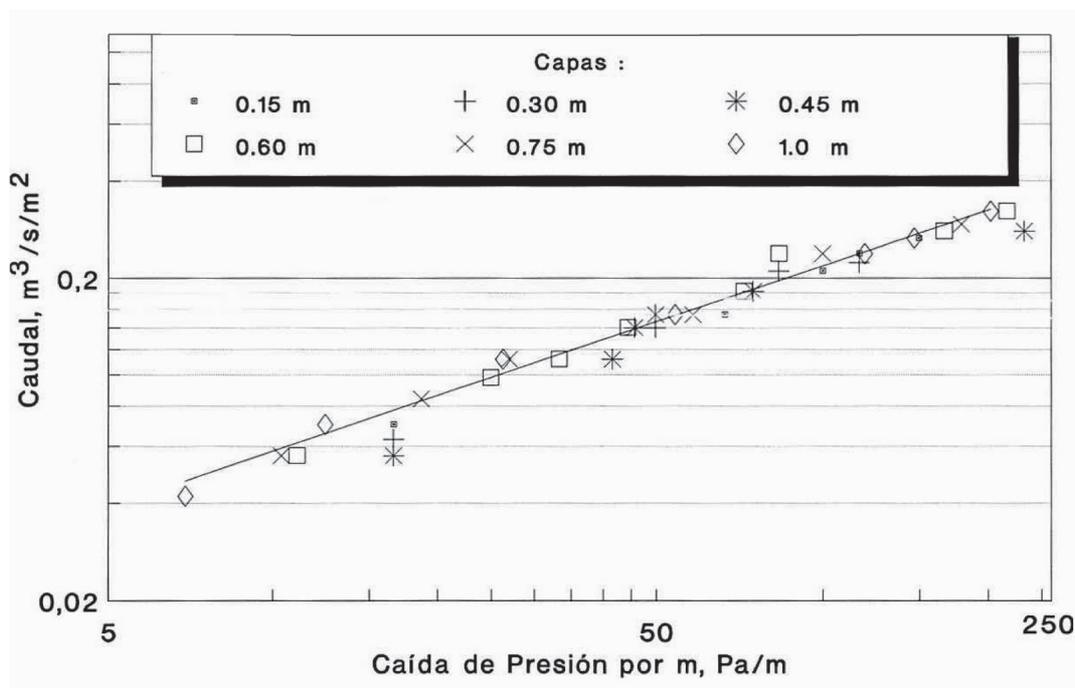


Figura 5. Resistencia al flujo de aire (RFA) a través de diferentes capas de coquito (almendra de la palma aceitera), como prueba preliminar con el equipo.

Fuente: (El autor).

procedió a obtener las diferencias de presión entre los niveles (plenum: 0,15 m, 0,30 m, 0,45 m, 0,60 m, 0,75 m y 1 m) y así obtener las caídas de presión media cada 0,15 m con su respectiva desviación típica, para un caudal específico y también para una capa de grano definida.

Los datos de caudal específico (Q_a) tomados en las pruebas preliminares, fueron graficados como una función de la caída de presión media en escala logarítmica en la Figura 5.

El comportamiento de los puntos experimentales tomados a diferentes capas fijas es exponencial, como se observa en la Figura 5 en escala logarítmica, lo cual concuerda con el comportamiento mostrado por otros productos agrícolas que se muestran en las curvas de RFA de la ASAE (Data: ASAE D272.1). Estos puntos experimentales tienen un carácter predictivo, o sea, que su comportamiento es regular en las pruebas hechas a diferentes espesores de grano, lo cual implica que en la metodología de las

pruebas en otro grano, lo esencial es realizar las mediciones a diferentes alturas de capa; sin embargo, es conveniente efectuarlas a capas mayores de 0,45 m para obtener al menos tres datos.

Si se grafican los puntos experimentales sobre las curvas empíricas de la ASAE (1984) esta curva preliminar de coquito cae en el ámbito esperado y tiene un comportamiento, similar al "lot 1 Ear Corn Harvested" 20 % de contenido de humedad.

4.2 Análisis del efecto del piso perforado en la RFA

Con el propósito de comprobar si el piso perforado produce algún efecto sobre la resistencia al flujo de aire, se graficó, en la Figura 6, la presión estática en función de la profundidad de la capa de grano, para el caso de la capa fija de 1 m, para diferentes caudales de aire (Q_a).

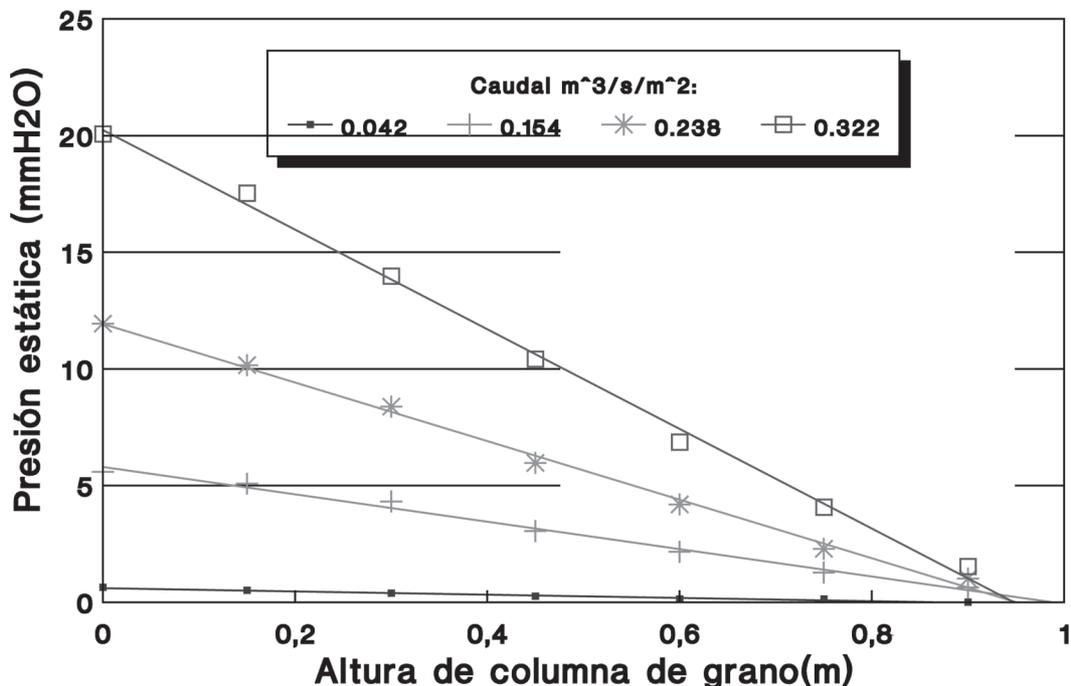


Figura 6. Perfil de presiones estáticas a lo alto de la columna de grano.
Fuente: (El autor).

Como se puede observar en la Figura 6, la presión estática disminuye de una forma lineal con respecto a la altura de la columna de grano. La pendiente de estas rectas corresponde a la RFA por unidad de espesor de grano, para un caudal específico (Q_a). Entonces, para un Q_a dado, se puede calcular la pendiente (caída de presión por unidad de espesor de capa), obteniéndose el perfil de las presiones y generándose un recta de ajuste donde se defina su pendiente; o bien, tomar al menos tres datos de presión estática a lo largo de la columna de grano (preferiblemente en los puntos más bajos), calcular la respectiva caída de presión (Δp) entre dos puntos y dividir esta magnitud entre el espesor de capa de grano en que se distribuye esta caída de presión. Este procedimiento de cálculo define los pares ordenados de caída de presión por capa de grano ($\Delta p/h$) y caudal específico (Q_a), los cuales definen la curva la RFA que ofrece el grano.

La influencia del piso perforado, en caso de existir, debería darse en el primer diferencial de presiones, o sea, entre el plenum (que es la profundidad 0) y $h = 0,15$ m. Así, esta diferencia debería ser más alta que las restantes diferencias (en caso de que el piso perforado ejerciera una caída de presión adicional) lo cual indicaría que esta primera medición no debería tomarse en cuenta. Sin embargo, este primer diferencial de presión presentó una magnitud muy similar a los demás.

Se realizaron varias pruebas para determinar las posibles pérdidas en la cámara pequeña de aire (Figura 3), no observándose ningún cambio o pérdida que se pueda cuantificar con el manómetro, por lo que para las pruebas, este factor, en otro grano, no es relevante.

CONCLUSIONES

1, El funcionamiento del equipo de pruebas fue satisfactorio, pues de una manera sencilla y segura este procedimiento y el equipo permiten determinar curvas de RFA en granos y semillas con un buen nivel de precisión. No obstante, es importante hacer notar que

en estudios de RFA en otros productos es indispensable considerar aspectos geométricos, pues estos pueden incidir en variaciones en el equipo para poder captar un ámbito apropiado de la curva, sin embargo, la metodología que se utiliza puede ser similar a la expuesta anteriormente.

2. El ámbito de trabajo obtenido con el equipo en las pruebas preliminares, osciló, para caudal específico (Q_a) entre $0,04 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}^2$ y $0,35 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}^2$; y para la caída de presión por unidad de espesor; entre $5 \text{ Pa}/\text{m}$ a $230 \text{ Pa}/\text{m}$ respectivamente, este ámbito de trabajo puede dar una idea de los tipos de granos que pueden ser trabajados en el equipo de pruebas.
3. La validez del equipo se da en la curva generada en las pruebas preliminares, pues tiene un comportamiento similar a las curvas empíricas de RFA encontradas en ASAE STANDARDS. Por otro lado, es importante indicar que la resistencia al paso del aire que brinda el piso perforado en relación con la resistencia de la capa de grano es despreciable, sin embargo, la configuración de las perforaciones debe ser tomada en cuenta para otros productos, pues estos pueden calzar con los orificios, incrementado la resistencia al flujo de aire, por lo que el área perforada efectiva es modificada.
4. El equipo de pruebas tiene un gran potencial de aplicación, pues puede facilitar la investigación de los factores involucrados en la RFA en granos de zona tropical de interés comercial y llenar el vacío de información existente al respecto, facilitando el análisis de la dinámica que puede presentarse, ya sea en la fase de diseño, o bien, en una planta de procesamiento de granos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agrawal, K. & Prem, Ch. (1974). Pressure drop across fixed beds of rough rice. *Transactions of the ASAE*, T3, 560-563.

- Aguilar, J. F. (1993). *Resistencia al flujo de aire en la almendra de la palma aceitera*. Proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Agrícola, Escuela de Ingeniería Agrícola, Facultad de Ingeniería, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Akritidis, C. B. & Siatras, A. J. (1979). Resistance of pumpkin seeds to air flow. *Transactions of the ASAE*, T6, 1414-1416.
- American Society of Agricultural Engineers (ASAE). (1982). *Agricultural Engineers Yearbook*. St. Joseph, Michigan, USA.
- Ashwini, K & Muir, W. E. (1986). Airflow resistance of wheat and barley affected by airflow direction, filling method and dockage. *Transactions of the ASAE*. 29(5):1423-1426.
- ASHRAE Handbook. (1992). Heating, ventilating, and air-conditioning systems and equipment. SI Ed. Atlanta, Ga.
- Calderwood, D. L. (1973). Resistance to airflow of rough, brown and milled rice. *Transactions of the ASAE*, T3, 525-527.
- Dalpasquale, V. A., Marcal de Queiroz, D., Marques, J. A. & Sinicio, R. (1991). Secado de granos: natural, solar y a bajas temperaturas. Oficina Regional de la FAO para América Latina y del Caribe, Santiago, Chile. Serie: Tecnología Poscosecha 9.
- Matthies, H. J. & Petersen, H. (1974). New data for calculating the resistance to air flow resistance of stored granular materials. *Transactions of the ASAE*, T6, 1144-1149.
- Sokkansanj, S., Falacinski, A. A., Sosulski, F. W., Jayas, D. S. & Tang, J.. (1990). Resistance of bulk lentils to airflow. *Transactions of the ASAE*. 33(4):1281-1285.
- Steele, J. L. (1974). Resistance of peanut to airflow. *Transactions of the ASAE*, 33(4):573-577.
- Wihelm, L. R., Tompkins, F. D. & Mulins, C. A. (1983). Airflow resistance of beans and pea pods. *Transactions of the ASAE*, 946-949.
- Yang, X. & Willians, D. L. (1990). Airflow resistance of grain sorghum as affected by bulk density. *Transactions of the ASAE*, T6, 1966-1970

SOBRE EL AUTOR

José Francisco Aguilar Pereira

Licenciado en Ingeniería Agrícola de la Universidad de Costa Rica y Magister Scientiae en Computación, opción Sistemas de Información del Instituto Tecnológico de Costa Rica
 Director de la Escuela de Ingeniería Agrícola e investigador del Instituto de Investigaciones en Ingeniería de la Universidad de Costa Rica.
 Teléfono: 207-4054
 Facsímil: 207-4614
 Apartado postal: 36-2060 San José, Costa Rica.
 Correo electrónico: jaguilar@ingagri.ucr.ac.cr