

## OPTIMIZACIÓN DEL CONSUMO ESPECÍFICO DE ENERGÍA EN EL PROCESO DE BENEFICIADO EN SECO DE VARIEDADES AMARGAS DE QUINUA, BASADO EN LA APLICACIÓN DE UN LECHO FLUIDIZADO DE TIPO SURTIDOR (LFTS)

### OPTIMIZATION OF ENERGY CONSUMPTION IN SPOUTED BED REACTORS (SBR) APPLIED TO SAPONINS REMOVAL ON BITTER QUINOA ECOTYPES

Mauricio Obando Estrada\*, Ramiro Escalera Vásquez\*, Carla Quiroga Ledezma\*\* y Luis Arteaga Weill\*

\*Centro de Investigaciones en Procesos Industriales - CIPI

\*\*Centro de Investigaciones Agrícolas y Agroindustriales Andinas – CIAAA  
Universidad Privada Boliviana  
rescalera@upb.edu

(Recibido el 03 de noviembre 2011, aceptado para publicación el 14 de diciembre 2011)

#### RESUMEN

Se ha minimizado el consumo específico de energía para el novedoso proceso de beneficiado en seco de quinua, mediante el empleo de un lecho fluidizado de tipo surtidor (LFTS). Se estudiaron las condiciones de operación y características básicas de funcionamiento del lecho, en la remoción de saponinas de la quinua real blanca, proveniente de zonas productivas en los departamentos de Oruro y Potosí.

Se utilizaron dos reactores de vidrio a escala laboratorio de 7,5 y 20 cm de diámetro, boquillas de 1,4 a 5 mm de diámetro y alturas de lecho estático entre 12,5 y 17,5 cm. Los reactores de laboratorio se alimentaron de aire utilizando un compresor de 400 Lmin<sup>-1</sup> de capacidad, provisto de dos medidores de flujo de 10-280 Lmin<sup>-1</sup> y de un filtro de humedad y aceite. Muestras de quinua real blanca fueron procesadas en estos equipos de acuerdo a un diseño experimental, evaluándose el efecto de los factores: diámetro de reactor, diámetro de boquilla, altura de lecho y tiempo de proceso sobre el consumo específico de energía, el porcentaje de remoción de saponinas y el porcentaje de pérdida de masa.

Los factores más preponderantes sobre el consumo específico de energía son: el diámetro de boquilla, diámetro de lecho, tiempo de proceso y altura de lecho, lográndose valores de consumo específico de energía mínimos (0,23 kWh kg<sup>-1</sup>) con la siguiente combinación: diámetro de boquilla 3 mm, diámetro de lecho 20 cm, altura de lecho de 12,5 cm y 60 min de tiempo. En estas condiciones se obtuvo un valor próximo a 0,01 % de saponinas y una pérdida de masa menor al 5%. Estos valores son inferiores a los obtenidos en estudios anteriores.

Para calcular la caída de presión en el lecho fluidizado de tipo surtidor, se han obtenido nuevos valores de las constantes  $K$  y  $n$  de la ecuación de Lama:  $K = 9,2572$  y  $n = 0,3308$ , para el lecho de 7,5 cm de diámetro y  $K = 12,8453$  y  $n = 0,3451$  para el de 20 cm. El uso de estas constantes permitió calcular la caída de presión global del sistema con bastante aproximación, respecto de los valores experimentales obtenidos para diferentes diámetros de boquilla y alturas de lecho. En general, las caídas de presión globales, para esta configuración de LFTS, son pequeñas, comparadas con las observadas en el anterior estudio [11], lo cual permitiría utilizar sopladores más económicos, en lugar de compresores de más alto precio, aspecto que favorece la economía del proceso.

#### ABSTRACT

The energy per unit mass, required for the novel saponins removal process from bitter quinoa grains (*Chenopodium quinoa Willd* sp.), by means of a Spouted Bed Reactor (SBR) was minimized. Basic SBR performance characteristics and operation conditions were studied on grains of the Real Blanca ecotype, grown at Oruro and Potosi departments, located in the Bolivian Altiplano.

Experimental runs were carried out using two laboratory-scale cylindrical-conical SBRs of 7.5 and 20 cm in diameter, 1.4 – 5 mm outlet diameter nozzles at static bed heights within 7.5 and 17.5 cm. Air was supplied by a 400 Lmin<sup>-1</sup> piston compressor, which included a 10 – 280 Lmin<sup>-1</sup> rotameter and an air filter for the removal of oil and humidity. A factorial design was applied, which included, as independent variables: reactor diameter, nozzle outlet diameter, bed height and processing time. Dependent variables were: energy per unit mass of processed grains, residual saponins content and mass loss percentage.

The factors which had larger effect on energy per unit mass were nozzle outlet diameter and reactor diameter, followed by process time and bed height. The minimum energy per unit mass was 0.23 kWh kg<sup>-1</sup> for the following combination: 3 mm : 20 cm : 12.5 cm : 60 min for nozzle diameter : reactor diameter : bed height : processing time, achieving a saponins concentration of 0.01% in treated grains and a mass loss percentage < 5%. These values are smaller than those reported before [11].

New values of  $K$  and  $n$  constants were obtained for Lama's equation used for the calculation of the spouted bed pressure loss:  $K = 9.2572$  and  $n = 0.3308$ , for the 7.5 cm SBR and  $K = 12.8453$  and  $n = 0.3451$  for the 20 cm SBR. Using these values, the overall pressure loss experimental and calculated values fit fairly well. These overall pressure

losses are smaller than those reported [11] and would be satisfied using more affordable air blowers, instead of the expensive high pressure screw-compressor required formerly.

**Palabras Clave:** Quinoa, Remoción de Saponinas, Lecho Fluidizado de Tipo Surtidor, Consumo de Energía.

**Keywords:** Quinoa, Saponins Removal, Spouted Bed Reactor, Energy Consumption.

## 1. INTRODUCCIÓN

La demanda de la quinua, debido a sus propiedades nutritivas excepcionales [1-4], ha crecido exponencialmente en los últimos años [5]. Especialmente, se ha comercializado la quinua con certificación orgánica en mercados internacionales donde se tiene gran interés en productos saludables, exóticos y comercio justo.

Las variedades y ecotipos de quinua boliviana tienen, en el episperma del grano, porcentajes elevados de saponina, la cual debe ser eliminada antes de su comercialización [6-8]. Las empresas beneficiadoras, establecidas en el país, utilizan sistemas convencionales de remoción de saponinas utilizando procesos combinados por vía húmeda y seca, los cuales generan volúmenes significativos de aguas residuales (14 m<sup>3</sup>/TM de quinua procesada), contaminadas con saponinas que se descargan sin tratamiento a los cuerpos naturales. Por otra parte, entre el 15% y 30 % de polvos con alto contenido de saponinas se pierden en estos residuos líquidos, puesto que su recuperación no es económicamente viable. Estos polvos, que representan el aproximadamente el 5% de la materia prima procesada, constituyen, actualmente, un recurso de mucho potencial para la fabricación de productos de alto valor agregado comercializados en el mercado internacional, en el espectro de una amplia gama de industrias, principalmente, las industrias farmacéutica y alimenticia [9].

El Centro de Promoción de Tecnologías Sostenibles (CPTS) [10], ha optimizado el sistema combinado anterior, con la introducción de mejoras en los procesos de escarificado, lavado y secado, que permiten ahorros en agua y energía. Este sistema ha sido adoptado por algunas beneficiadoras de tamaño mediano y relativamente grande. Sin embargo, si bien el consumo de agua se ha reducido a 5 m<sup>3</sup>/TM de quinua procesada, se considera todavía importante en regiones donde este recurso es escaso y la precipitación pluvial alcanza solamente a 150-200 mm por año. El consumo energético, de aproximadamente 130 kWh/TM, se debe principalmente a la utilización de gas licuado en la etapa de secado de los granos lavados.

Para resolver las desventajas arriba detalladas, investigadores de la Universidad Privada Boliviana han desarrollado un novedoso proceso de desaponificación en seco de granos de variedades amargas de quinua, basado en la aplicación de un lecho fluidizado de tipo surtidor, tomando en cuenta los principios de Producción Más Limpia.

El proceso seco propuesto, ha logrado reducir la concentración de saponinas en los granos hasta valores menores al 0,01 % que refleja un estándar comercial de exportación y mucho menores al 0,12% estipulado por la Norma Boliviana en tiempos menores a los 30 min y ha logrado recuperar completamente los polvos de saponinas, sin deteriorar la calidad nutritiva del grano [11-12]. Sin embargo, las pérdidas de masa son todavía elevadas (hasta el 7%) y el consumo específico de energía es varias veces mayor al obtenido por el sistema implantado por el CPTS (0,621 vs. 0,130 kWh/kg)

En el presente estudio se determinaron las condiciones de operación bajo las cuales el consumo específico de energía y las pérdidas de masa se minimizan, en un lecho fluidizado de tipo surtidor de geometría cilíndrico-cónica aplicada a la remoción de polvos de saponinas en granos de quinua real.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1. Pruebas de caracterización de lecho de tipo surtidor

#### (a) *Equipo experimental*

Se utilizó el mismo equipo experimental del estudio anterior [11], Figura 1, que consta de:

- Un compresor a pistón de 400 Lmin<sup>-1</sup> de capacidad de flujo de aire a una presión manométrica de operación de 8 bar (un máximo de 12 bar), provisto de un tanque de 200 L. El compresor es accionado por un motor de 5 hp.
- Un filtro de aire, para remover la humedad y los aceites contenidos, que está provisto de un manómetro para regular la presión de alimentación del aire al lecho.
- Un medidor de flujo de aire de 10-280 Lmin<sup>-1</sup> (de mayor capacidad que en el anterior estudio).

- Dos columnas de vidrio cilíndrico-cónicas: una de 7,44 cm de diámetro interno, cono de 30° de inclinación y una altura de 40 cm; la otra, de 20 cm de diámetro externo con un cono de 45° de inclinación y altura de 50 cm. Las dos columnas tienen un tubo de entrada de aire de 6 mm de diámetro interno, al que se pueden adaptar boquillas cónicas de distintos diámetros.
- Un filtro-manga recolector de polvos de tela de porosidad adecuada, provista de una malla que no deja pasar los granos.
- Un estante construido con angulares metálicos tipo mecano, provisto de tableros melamínicos que soportan los aparatos y accesorios.

#### (b) *Pruebas de caracterización de lecho*

Para determinar experimentalmente los intervalos de valores de las condiciones de operación requeridas para establecer un lecho fluidizado estable y apropiado para la remoción de saponinas, se midieron:

- Velocidades de flujo volumétrico de aire (lectura de medidor).
- Alturas de lecho posibles en función de la capacidad del equipo experimental (capacidad de lectura del rotámetro y capacidad de lectura del manómetro del compresor).
- Presiones manométricas de operación antes del flujómetro
- Masas iniciales de quinua en función de las alturas y diámetro de lecho.
- Masas de quinua después del procesamiento en cada corrida



**Figura 1-** Equipo experimental con todos los elementos.

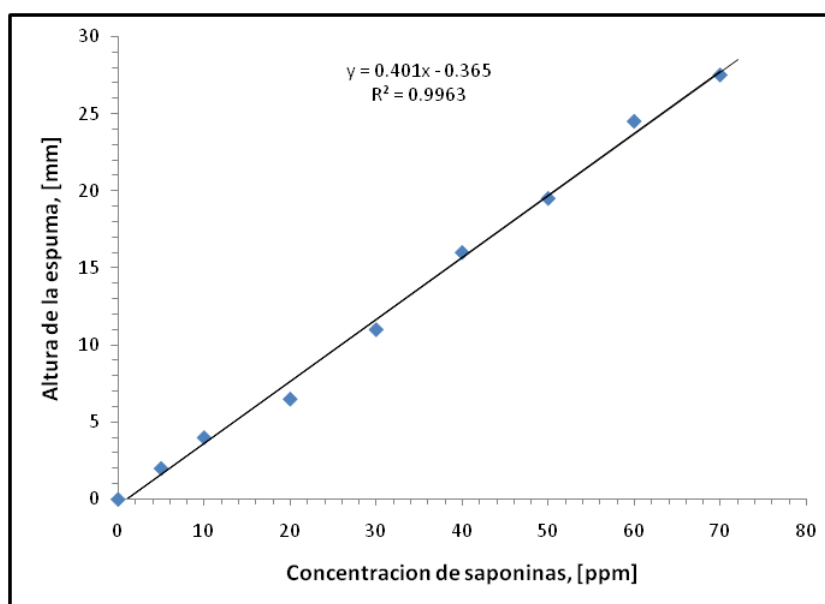
## 2.2. Evaluación del consumo específico de energía y los rendimientos en la desaponificación

### ▪ *Diseño experimental*

Se escogieron los 4 factores siguientes e intervalos de valores, de acuerdo con los resultados de pruebas preliminares de caracterización de lecho: diámetro de boquilla, 1,4 – 5 mm; diámetro de lecho, 7,5 – 20 cm; altura de lecho, 12,5 – 17,5; tiempo de procesamiento, 30 – 60 min.

Como variables dependientes se consideraron: (1) el consumo específico de energía, (2) el porcentaje residual de saponinas, (3) el porcentaje de remoción de saponinas y (4) el porcentaje de pérdidas de masa.

El consumo específico de energía se determinó en base al trabajo realizado sobre el fluido en condiciones adiabáticas. El porcentaje de saponinas en los granos tratados y sin tratar, se determinó mediante el método de la espuma descrito en la norma NB 683 [13]. La Figura 2 muestra la curva de calibración obtenida [14].



**Figura 2** - Curva de calibración para determinación del contenido de saponinas mediante el método de la espuma según Norma Boliviana NB-683 [14].

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Pruebas preliminares de consume específico de energía

La Tabla 1 muestra el consumo específico de energía eléctrica del compresor en el sistema de remoción de saponina en seco (LFTS) bajo los siguientes intervalos de valores de las variables independientes: diámetro de lecho, 7,5 – 20 cm; altura de lecho, 7,5 – 12,5 cm; diámetro de boquilla, 1 – 5 mm; tiempo de tratamiento de 30 minutos. El consumo eléctrico fue calculado como el producto entre el tiempo de funcionamiento efectivo del compresor medido en horas y la potencia nominal del motor de 3,75 kW.

Los resultados marcan la tendencia en cuanto al consumo de energía en el sistema, y muestran que los factores que influyen en el consumo específico de energía son la carga de quinua tratada (diámetro y altura de lecho) y el diámetro de boquilla empleado (presión y flujo de aire de operación).

Se observó que las boquillas de diámetro mayor (3 y 4 mm) permiten tratar cargas de quinua mayores con presiones de operación bajas (0,8 – 1,2 kg<sub>f</sub>cm<sup>-2</sup>) y las boquillas de diámetro pequeño (menores a 2 mm) requieren presiones de operación elevadas (2 – 3,5 kg<sub>f</sub>cm<sup>-2</sup>). Las boquillas de diámetro de 1 mm o menor no pueden romper lechos con cargas de quinua grandes (diámetro de 20 cm y alturas mayores a 12,5 cm).

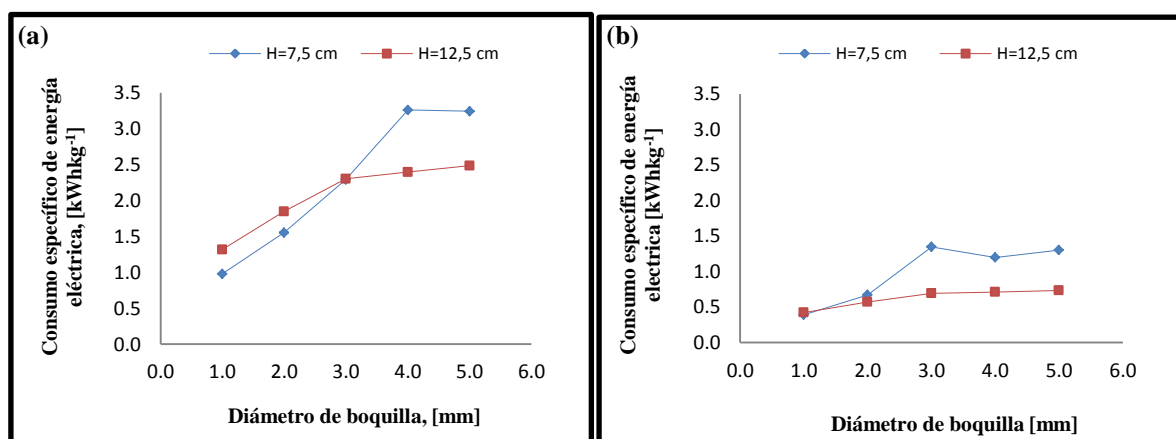
La Figura 3 muestra el comportamiento del consumo específico de energía eléctrica en función del diámetro de boquilla para lechos de 7,5 cm y 20 cm de diámetro. En el LFTS de 7,5 de diámetro (Figura 3 a), se observó que el consumo específico de energía para la altura de lecho de 7,5 cm se incrementa fuertemente con el diámetro de la boquilla hasta 4 mm. En cambio, a una altura de 12,5 cm esta dependencia se hace más suave hasta 3 mm y los valores del consumo son mayores que para el lecho de menor altura, cuando las boquillas son de diámetro pequeño (1 y 2 mm) y son menores cuando las boquillas son de diámetro mayor (3 y 4 mm). Esta misma tendencia se aprecia para el lecho de mayor diámetro (Figura 3 b). Sin embargo, los valores de consumo específico son substancialmente menores que para el lecho de menor diámetro, debido a las mayores masas tratadas (440 -1450 g para el lecho de 7,5 cm vs. 190 – 350 g para el de 20 cm). Por otra parte, se observa que el diámetro de boquilla de 5 mm no genera ahorros significativos en cuanto a consumo específico de energía, aún en el lecho de mayor masa.

Estas tendencias indican que a menores diámetros de boquilla (menores flujos de aire), mayores diámetros de lecho y mayores alturas de lecho (mayores cargas de quinua), los consumos específicos de energía eléctrica se minimizan. Estos resultados concuerdan con los reportados en el estudio anterior [11]. Sin embargo, las boquillas de diámetro menor o igual a 1 mm requieren presiones de rompimiento del lecho estático mayores a 6 kg<sub>f</sub> cm<sup>-2</sup> para alturas de lecho de 12,5 cm, en lechos de diámetro pequeño y no pueden romper el lecho a diámetros más grandes. Por otra parte, se ha observado que estas boquillas no permiten la remoción homogénea de saponinas, generando lechos que se estancan en la región anular descendente [11, 12].

**TABLA 1- CONSUMO ESPECIFICO DE ENERGÍA ELÉCTRICA BAJO DISTINTAS CONDICIONES DE PROCESAMIENTO**

| Corrida N° | Diámetro de lecho, [cm] | Altura de lecho, [cm] | Diámetro de la boquilla, [mm] | Masa de quinua, [kg] | Consumo específico de energía eléctrica, [kWhkg <sup>-1</sup> ] |
|------------|-------------------------|-----------------------|-------------------------------|----------------------|---|
| 1          | 20                      | 12,5                  | 5,0                           | 1,450                | 0,734   |
| 2          | 20                      | 7,5                   | 2,0                           | 0,440                | 0,670   |
| 3          | 7,5                     | 12,5                  | 5,0                           | 0,350                | 2,484   |
| 4          | 7,5                     | 12,5                  | 4,0                           | 0,350                | 2,395   |
| 5          | 7,5                     | 7,5                   | 1,0                           | 0,190                | 0,978   |
| 6          | 20                      | 7,5                   | 3,0                           | 0,440                | 1,346   |
| 7          | 20                      | 12,5                  | 2,0                           | 1,450                | 0,571   |
| 8          | 7,5                     | 7,5                   | 4,0                           | 0,350                | 3,258   |
| 9          | 20                      | 7,5                   | 4,0                           | 0,440                | 1,201   |
| 10         | 20                      | 12,5                  | 3,0                           | 1,450                | 0,696   |
| 11         | 20                      | 7,5                   | 1,0                           | 0,440                | 0,390   |
| 12         | 7,5                     | 7,5                   | 5,0                           | 0,190                | 3,240   |
| 13         | 7,5                     | 12,5                  | 3,0                           | 0,350                | 2,302   |
| 14         | 7,5                     | 7,5                   | 2,0                           | 0,190                | 1,554   |
| 15         | 7,5                     | 7,5                   | 3,0                           | 0,190                | 2,293   |
| 16         | 20                      | 12,5                  | 4,0                           | 1,450                | 0,711   |
| 17         | 7,5                     | 12,5                  | 2,0                           | 0,350                | 1,848   |
| 18         | 20                      | 7,5                   | 5,0                           | 0,440                | 1,302   |
| 19         | 20                      | 12,5                  | 1,0                           | 1,450                | 0,423   |
| 20         | 7,5                     | 12,5                  | 1,0                           | 0,350                | 1,317   |

En sentido práctico, esta situación infiere dificultades operativas y requerimientos de equipos que provean altas presiones de operación a 4 000 m.s.n.m., como los compresores de tornillo de alto precio. Boquillas de mayor diámetro, permiten romper y generar lechos estables con presiones bastante más bajas a flujos de aire mayores, con consumos específicos relativamente pequeños, Figura 3 b).



**Figura 3 - Comportamiento del consumo eléctrico específico en relación al diámetro de boquilla: (a) Diámetro de lecho = 7,5cm; (b) Diámetro de lecho = 20 cm.**

### 3.2. Pruebas de caracterización del lecho

A la luz de los resultados anteriores, se procedió a realizar pruebas de caracterización de lecho para alturas de lecho entre 12,5 y 17,5 cm, diámetros de boquilla entre 2 y 4 mm y diámetros de lecho entre 7,5 y 20 cm. La Tabla 2 resume el comportamiento del lecho de 20 cm de diámetro.

En este reactor se observó que diámetros de boquilla pequeños no generan una mezcla homogénea y rápida de los granos de quinua que están siendo tratados, debido a la mayor cantidad de quinua, por lo cual el tiempo de tratamiento debe ser mayor. Las boquillas de diámetro mayor generan mayor mezcla de los granos durante su tratamiento, lo cual disminuye el tiempo de tratamiento necesario.

En forma general, se ha observado que, para generar una mezcla homogénea en el anillo descendente del lecho, la altura de la fuente es mayor en el caso del lecho de mayor diámetro, debido a los flujos volumétricos mayores requeridos para generar condiciones estables. La Figura 4 ilustra este comportamiento para los dos diámetros de lecho, cuando se utilizó una boquilla de 3 mm de diámetro y altura de lecho de 12,5 cm.

**TABLA 2 - CARACTERÍSTICAS DEL LECHO FORMADO BAJO DISTINTAS CONDICIONES (D=20 CM)**

| Diámetro de boquilla, [mm] | Altura de lecho, [cm] | Características del lecho formado   |
|----------------------------|-----------------------|---|
| 2,0                        | 12,5                  | Lecho estable, movimiento de los granos de quinua únicamente cerca de la línea central del lecho.   |
|                            | 15,0                  | Poco nivel de mezcla de los granos de quinua, movimiento solo en la línea central del lecho.  |
|                            | 17,5                  | No se pudo generar el lecho fluidizado, debido a que la presión de rompimiento era muy alta.  |
| 3,0                        | 12,5                  | Presión de rompimiento baja, los granos de quinua se mezclan homogéneamente. Existe mezcla de los granos a lo largo de todo el lecho.             |
|                            | 15,0                  | Movimiento caótico de los granos de quinua en la fuente, los granos de quinua golpean contra las paredes del reactor.                             |
|                            | 17,5                  | Movimiento caótico, los granos de quinua golpean contra las paredes del reactor. Presión de operación elevada.                                    |
| 4,0                        | 12,5                  | Movimiento homogéneo, los granos de quinua en la fuente tienden a chocar contra las paredes del reactor.  |
|                            | 15,0                  | Los granos de quinua en la fuente muestran un movimiento irregular, chocan contra las paredes del reactor. Se observa buena mezcla de los granos. |
|                            | 17,5                  | Movimiento caótico, los granos de quinua golpean contra las paredes del reactor, el lecho tiende a colapsar.                                      |



**Figura 4-** Comportamiento del surtidor generado ( $h=12,5$  cm; diámetro de boquilla = 3 mm).  
(a) Diámetro de lecho = 7,5 cm; (b) Diámetro de lecho = 20 cm.

Las Figuras 5 (a) y (b) muestran la presión de operación requerida por el sistema para establecer un lecho estable en función de la altura de lecho, para los diámetros de lecho de 7,5 y 20 cm. Se observa que las boquillas de menor diámetro requieren presiones de operación mayores para establecer lechos estables. Además, se observa que la presión de operación aumenta en función de la altura de lecho y, en el caso de las boquillas de 3 y 4 mm, este incremento es menor comparado al incremento observado en la boquilla de 2 mm.

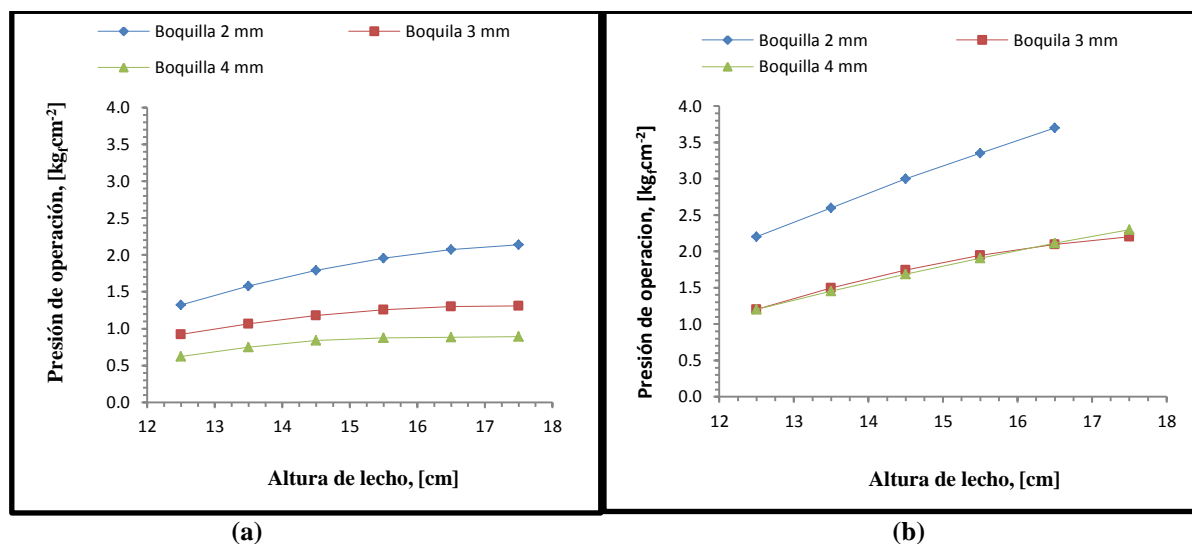


Figura 5 - Presión de operación en función de la altura de lecho: (a) D =7,5 cm; (b) D = 20 cm

Estos resultados se podrían explicar, en parte, por las caídas de presión mayores que se ocasionan con la mayor reducción del diámetro en el caso de la boquilla de 2 mm (el diámetro interno de la manguera de goma es de aproximadamente 8 mm). Por otra parte, en el lecho de 7,5 cm de diámetro, la velocidad de incremento de la presión de operación con las alturas de lecho, es menor que la velocidad de incremento correspondiente al lecho de 20 cm. Estos resultados sugieren que, el aporte de la caída de presión en la boquilla a la caída de presión global (principalmente, caída de presión hasta la boquilla + caída de presión en el lecho) es más importante en el caso del lecho de diámetro menor, debido al menor recorrido del aire en dirección lateral. En lechos de diámetro mayor el aporte de la caída de presión en el lecho se hace más significativo.

La Figura 6 muestra el comportamiento del flujo de operación, expresado como flujo estándar (calculado a 1 atm y 25°C) en función a la altura de lecho. Las boquillas de diámetro mayor requieren mayores flujos de operación para generar lechos estables y se observa que a medida que la altura de lecho aumenta el flujo de operación también lo hace.

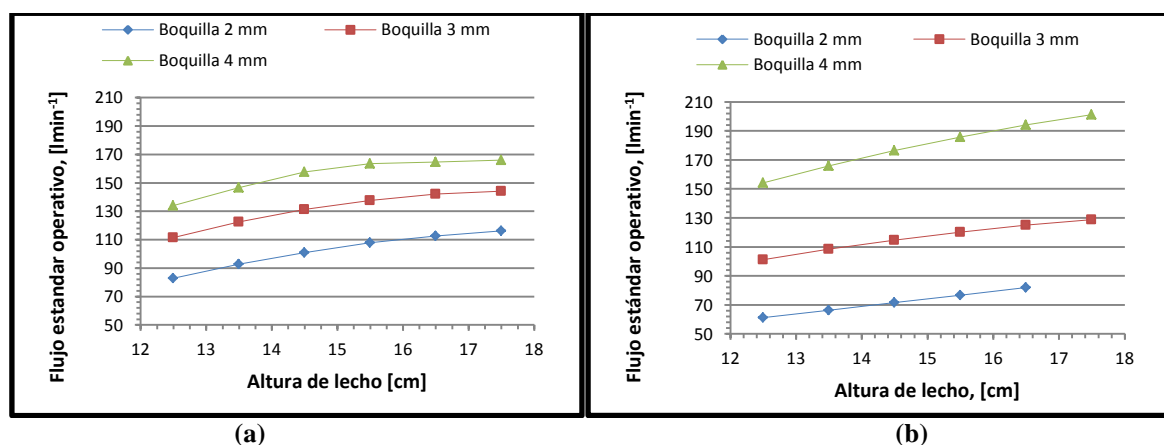


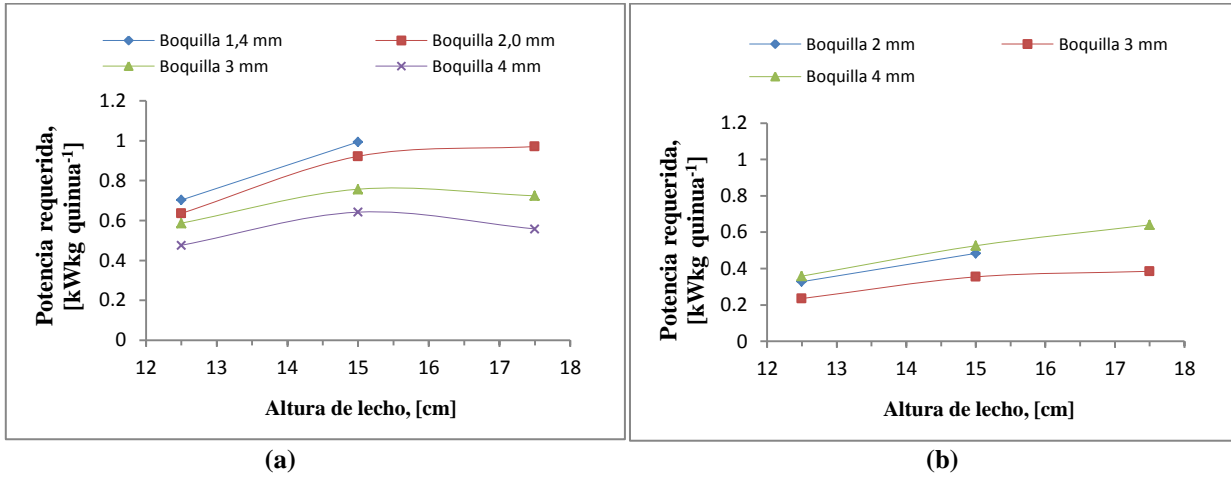
Figura 6 - Flujo estándar en función de la altura de lecho: (a) D =7,5 cm; (b) D = 20 cm.

### 3.3. Determinación de condiciones óptimas

Se realizaron pruebas de laboratorio, para determinar los valores óptimos de las variables independientes propuestas, que permitan disminuir el consumo de energía en el sistema de beneficiado en seco sin comprometer la calidad nutricional del producto generado. Las pruebas se realizaron por separado para cada reactor.

▪ **Determinación de la altura de lecho óptima**

Para determinar la altura de lecho óptima, se calculó la potencia requerida por el sistema para tratar lechos de distintas alturas, sobre la base de los flujos estándar requeridos y las presiones registradas en cada caso. La Figura 7 muestra la relación entre las potencias requeridas y las alturas de lecho, para los dos diámetros de lecho estudiados.



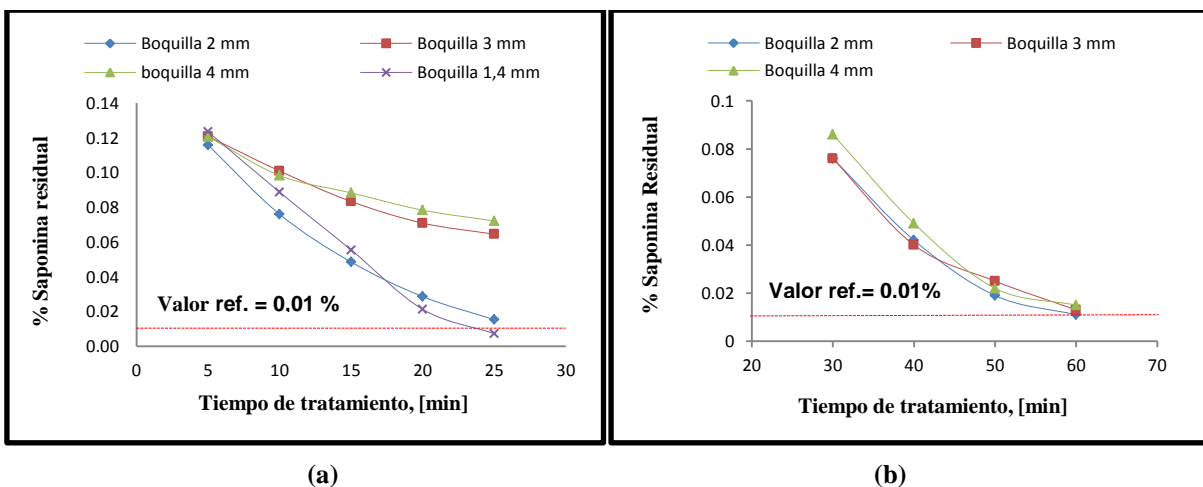
**Figura 7-** Potencia específica requerida en función de la altura de lecho. (a) D = 7,5 cm; (b) D = 20 cm.

Los resultados muestran que, en los dos casos, para cualquier diámetro de boquilla, la potencia específica requerida es menor para el lecho de altura de 12,5 centímetros. Este comportamiento se debe a que los lechos de altura mayor a 12,5 cm requieren presiones y flujos de operación altos, y tienen a ser inestables. Si bien la carga de quinua se incrementa, este aumento no es tan significativo como el aumento de la presión y flujo requeridos para generar la fluidización. Por otra parte, para el lecho de 20 cm, las potencias requeridas para cada altura de lecho son más bajas que para el lecho de 7,5 cm.

**3.4. Evaluación de la remoción de saponinas**

El contenido de saponina residual en las muestras de quinua tratadas, se evaluó mediante el método de la espuma descrito en la norma boliviana NB 683. Se construyó la curva del contenido de saponina residual en función del tiempo para distintos diámetros de boquilla para lechos de diámetro de 7,5 cm y 20 cm y una altura de lecho definida de 12,5 cm.

La Figura 8 muestra el comportamiento de la cinética de remoción de saponinas para la quinua real Blanca de Uyuni para ambos diámetros de lecho.



**Figura 8-** Contenido de saponina residual en función del tiempo de tratamiento. (a) D = 7,5 cm; (b) D = 20 cm.

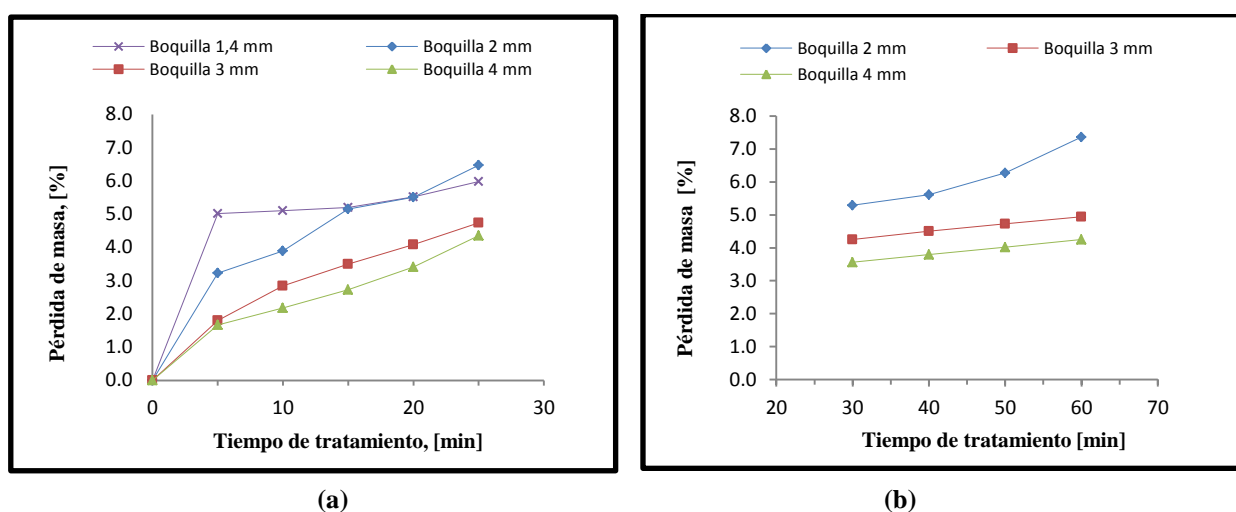


En el lecho de menor diámetro, se observa que las boquillas de menor diámetro remueven las saponinas del grano con mayor rapidez, por tanto se requieren menores tiempos de operación para alcanzar el valor referencial registrado por el CPTS (0,01 % saponina residual). Las boquillas de diámetro de 3 y 4 milímetros requieren un tiempo de tratamiento mucho mayor a 30 minutos para generar granos con porcentajes de 0,01 % de saponina residual.

En cambio, en el lecho de mayor diámetro, las velocidades de remoción de saponinas no difieren mucho con el diámetro de la boquilla. Sin embargo, todas requieren tiempos un poco mayores de 60 min para llegar al valor referencial de 0,01 %.

### 3.5. Evaluación de la pérdida de masa

La Figura 9 muestra el comportamiento de la pérdida de masa en función al tiempo para distintos diámetros de boquilla, para los lechos de 7,5 y 20 cm de diámetro.



**Figura 9-** Comportamiento de la pérdida de masa en función al tiempo de tratamiento: (a) D=7,5 cm) y (b) D = 20 cm.

En forma general, se observa que la pérdida es menor para diámetros de boquilla mayores, esto se debe a que en estas boquillas las velocidades lineales de aire al ingreso del surtidor son menores, lo cual reduce el desgaste del grano de quinua durante el proceso de desaponificación.

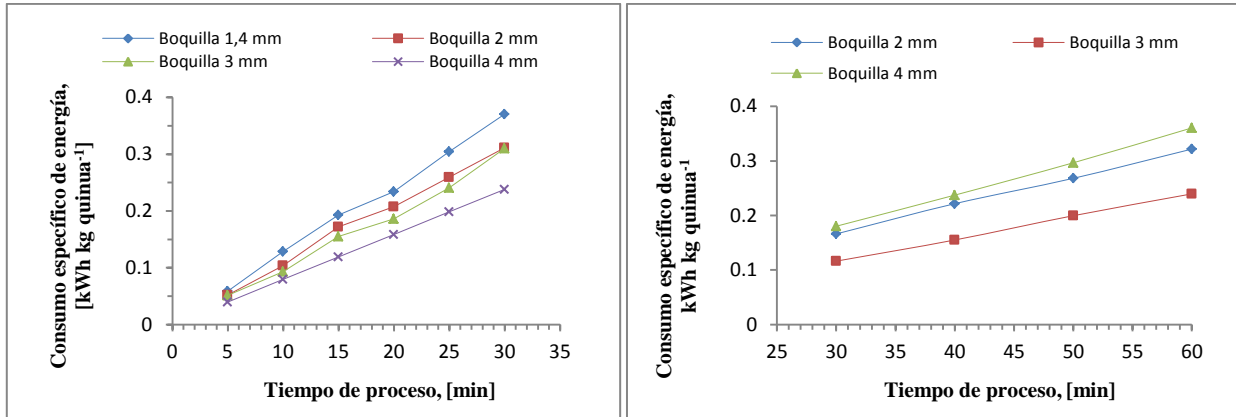
En el lecho de 20 cm y boquillas de diámetro de 3 y 4 mm, las pérdidas alcanzan un valor de 4,8 % y 4,2 %, respectivamente, incluso a los 60 min de tiempo, en el cual los porcentajes de saponina residual se aproximan al valor referencial de 0,01%. Estos valores son mucho menores a los registrados en la bibliografía [11], para condiciones óptimas, donde las pérdidas de masa ascienden a 7,2 %.

### 3.6. Evaluación del consumo de energía

La Figura 10 muestra el consumo específico de energía en función del tiempo de proceso, para los dos diámetros de lecho. El consumo fue calculado como el producto de la potencia requerida por el tiempo de proceso. Se puede observar que en el caso del reactor pequeño, la boquilla de 4 mm es la que consume menos energía hasta los 30 min. En cambio, en el reactor de mayor tamaño, la boquilla de 3 mm consume menor energía alcanzando los mismos valores que la boquilla anterior, pero en tiempos de 60 min.

En general, el consumo específico de energía en el reactor de 20 cm de diámetro es menor al registrado en el reactor pequeño, debido, principalmente, a la diferencia entre la carga de quinua que se puede tratar (1450 gramos frente a 350 gramos para el reactor pequeño). El tiempo de tratamiento es mayor pero no influye en mayor medida que la carga de quinua tratada.

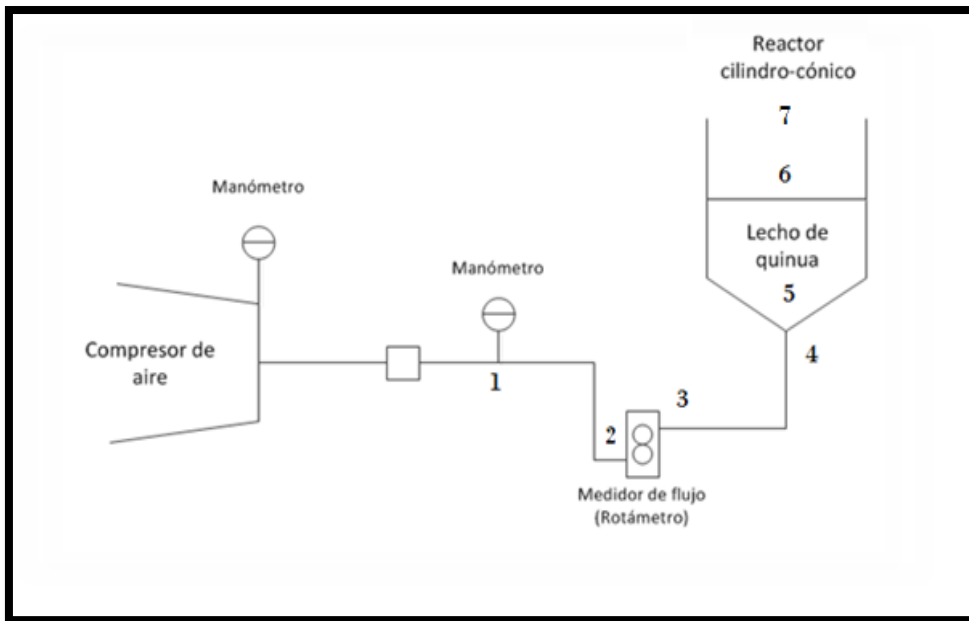
Considerando la remoción de saponinas, Figura 10, el consumo específico de energía para lograr un porcentaje de saponina residual de 0,01% en el reactor pequeño es de aproximadamente  $0,3 \text{ kWh kg}^{-1}$ , con una boquilla de 1,4 mm en un tiempo de 25 min. En cambio, en el reactor grande, el consumo específico de energía, para lograr esos valores de saponina residual, es de aproximadamente  $0,23 \text{ kWh kg}^{-1}$  en un tiempo de 60 min y con una boquilla de 3 mm.



**Figura 10** - Consumo específico de energía en función del tiempo de proceso: (a) D=7,5 cm) y (b) D = 20 cm.

### 3.7. Simulación de las pérdidas de presión en el LFTS

La Figura 11 muestra el esquema del sistema, el cual está compuesto por un equipo de provisión de aire (compresor a pistón), dos manómetros, un medidor de flujo de área variable (rotámetro), un reactor cilindro-cónico donde está contenido el lecho de quinua y una manga filtro.



**Figura 11** - Diagrama del equipo de desaponificación en seco.

Se evaluaron las pérdidas de presión desde el punto 1 hasta el punto de salida de aire 7, posterior a la manga de recolección de polvos. Estas pérdidas comprenden los siguientes tramos: (a) Tramo recto entre los puntos 1 y 2; (b) rotámetro; (c) Tramo recto entre los puntos 3 y 4; (d) Boquilla reductora; (e) Lecho fluidizado y (f) manga recolectora de polvos.

Se utilizaron las siguientes ecuaciones por tramo:

#### (a) Tramos rectos

Las pérdidas en los tramos rectos, corresponden a la caída de presión debido a la fricción dentro de las mangueras de alimentación. Las mangueras tienen una rugosidad relativa de 0,04 y un diámetro de 10 mm. Para la evaluación de esta caída de presión, las ecuaciones utilizadas son [15]:

$$P_1^2 - P_2^2 = \frac{4 * f * \Delta L * G^2 * R * T}{D * M} + \frac{2 * G^2 * R * T}{M} \ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right) \quad (1)$$

donde  $P_1$  y  $P_2$  son las presiones absolutas al principio y final del tramo,  $\Delta L$  es la longitud del tramo,  $f$  el factor de fricción de Fanning,  $D$  el diámetro interno de la manguera,  $G$  es el flujo específico de masa,  $R$  es la constante universal de los gases,  $M$  es el peso molecular del aire y  $T$  es la temperatura absoluta en el tramo.

### (b) Rotámetro

La caída de presión en el rotámetro, es mínima y está en función sus características de construcción [16]. La pérdida de presión está dada por:

$$\Delta P = 2 * \left[ \frac{G_f - v_f * \rho_f * g}{A_f} \right] \quad (2)$$

$G_f$  es el peso del flotador y  $v_f$  su volumen,  $\rho_f$  es la densidad del fluido y  $A_f$  es el área de sección más grande del flotador en el rotámetro. Todas las magnitudes están medidas en unidades del sistema internacional (SI).

### (c) Boquilla

La caída de presión a la salida de la boquilla está dada por [15]:

$$\Delta P = \left[ 0,55 * \left( 1 - \frac{A_{salida}}{A_{entrada}} \right) * \frac{v_{salida}^2}{z_\alpha} \right] \quad (3)$$

donde  $\Delta P$  es la caída de presión,  $A_{entrada}$  y  $A_{salida}$  son las áreas de sección transversal a la entrada y salida de la contracción,  $v_{salida}$  es la velocidad lineal a la salida de la contracción,  $\alpha$  es el factor de corrección de energía cinética (1 para flujo turbulento) y  $\rho_{prom}$  es la densidad del aire promedio entre los dos puntos.

La caída de presión en la expansión brusca está dada por [15]:

$$\Delta P = \left[ \left( 1 - \frac{A_c}{A_d} \right)^2 * \frac{v_c^2}{2\alpha} \right] \rho_{prom} \quad (4)$$

donde  $A_c$  y  $A_d$  son las áreas de sección transversal a la entrada y salida de la expansión,  $v_c$  es la velocidad lineal a la salida de la expansión,  $\alpha$  es el factor de corrección de energía cinética (1 para flujo turbulento) y  $\rho_{prom}$  es la densidad del aire promedio entre los dos puntos.

### (d) Lecho

La ecuación general para la pérdida de presión por unidad de longitud del lecho,  $\Delta P/L$ , en un lecho fluidizado de tipo surtidor descrita por R. Lama [17], se muestra a continuación.

$$\frac{\Delta P}{L} = K * G^n * \left( \frac{D_p}{\mu} \right)^n * \left( \frac{\mu^2}{\rho_f} \right) * \left( \frac{\lambda^{3-n}}{D_p^3} \right) * \left( \frac{(1-\varepsilon)^{3-n}}{\varepsilon^3} \right) \quad (5)$$

donde  $K$  es una constante de proporcionalidad que depende de las características del sistema;  $n$  es el valor que caracteriza al tipo de flujo y se toma un valor de 1 para flujo laminar y 2 para flujo completamente turbulento [14];  $G$  es el flujo másico por unidad de área de sección transversal de lecho vacío;  $D_p$  es el diámetro nominal de la partícula;  $\lambda$  es el inverso del factor de esfericidad de la partícula;  $\varepsilon$  es la fracción de vacío en el lecho y  $\mu$  es la viscosidad dinámica del fluido.

La ecuación (7) puede expresarse de la forma:

$$\frac{\Delta P}{L} = K_i * G^n \quad (6)$$

donde  $K_t$  es una constante que incluye las características del lecho, la constante descrita en la ecuación original de Lama y la densidad promedio del fluido que entra al lecho.

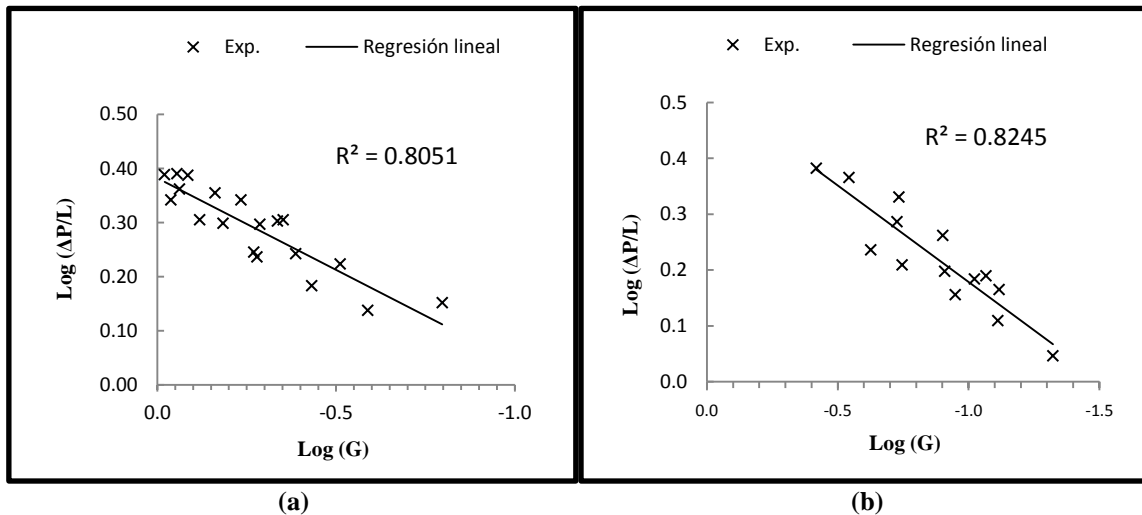
$$K_t = K * \left(\frac{D_p}{\mu}\right)^n * \left(\frac{\mu^2}{\rho_f}\right) * \left(\frac{\lambda^{3-n}}{D_p^3}\right) * \left(\frac{(1-\varepsilon)^{3-n}}{\varepsilon^3}\right) \quad (7)$$

El valor de  $K_t$  es fijo, para valores constantes de  $n$  y de la densidad del fluido. Bajo las condiciones de presión y temperatura a la entrada del lecho, se observó que la densidad del aire variaba muy poco en cada corrida, lo cual permitió utilizar la densidad promedio en la ecuación (5).

La ecuación (7) puede expresarse de la forma:

$$\log\left(\frac{\Delta P}{L}\right) = n * \log(G) + \log(K_t) \quad (8)$$

La ecuación (8) tiene la forma de una línea recta si  $n$  y  $K_t$  son constantes. En función a los datos experimentales obtenidos, se realizó el análisis de regresión para determinar los valores de  $n$  y  $K_t$ . La Figura 12 (a) y (b) muestra los resultados de la regresión para lechos de diámetro de 7,5 ( $r = 0,901$ ) y 20 cm ( $r = 0,908$ ), respectivamente, corroborando la hipótesis de la relación expresada en la ecuación 8.



**Figura 12** - Curva de regresión para el modelo de pérdidas de presión en el LFTS: (a) Diámetro de lecho = 7.5 cm (b) Diámetro de lecho = 20 cm.

Finalmente, para la pérdida de presión en el LFTS por unidad de longitud se tiene las ecuaciones (9) y (10).

$$\frac{\Delta P}{L} = 9,2572 * G^{0,3388} * \left(\frac{D_p}{\mu}\right)^{0,3388} * \left(\frac{\mu^2}{\rho_f}\right) * \left(\frac{\lambda^{2,6612}}{D_p^3}\right) * \left[\frac{(1-\varepsilon)^{2,6612}}{\varepsilon^3}\right] \quad (9)$$

para el lecho de 7,5 cm de diámetro y,

$$\frac{\Delta P}{L} = 12,8463 * G^{0,3451} * \left(\frac{D_p}{\mu}\right)^{0,3451} * \left(\frac{\mu^2}{\rho_f}\right) * \left(\frac{\lambda^{2,6549}}{D_p^3}\right) * \left[\frac{(1-\varepsilon)^{2,6549}}{\varepsilon^3}\right] \quad (10)$$

para el lecho de 20 cm.

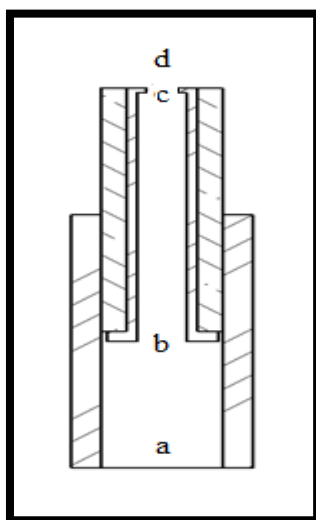
**(f) Manga recolectora de polvos**

La pérdida de presión en la manga recolectora se midió experimentalmente, como la diferencia entre las presiones manométricas medidas en el sistema con manga y sin manga.

**(g) Comparación de datos experimentales con datos calculados**

La simulación se realizó para el lecho de diámetro de 20 cm. Se varió la altura de lecho desde 12,5 cm hasta 17,5 cm con intervalos de 1 cm y se consideraron las boquillas de 2, 3 y 4 mm.

Las boquillas empleadas tenían una sección circular constante, con una contracción en la parte superior, para la salida de aire hacia el lecho. La Figura 13 muestra la vista en corte de las mismas.



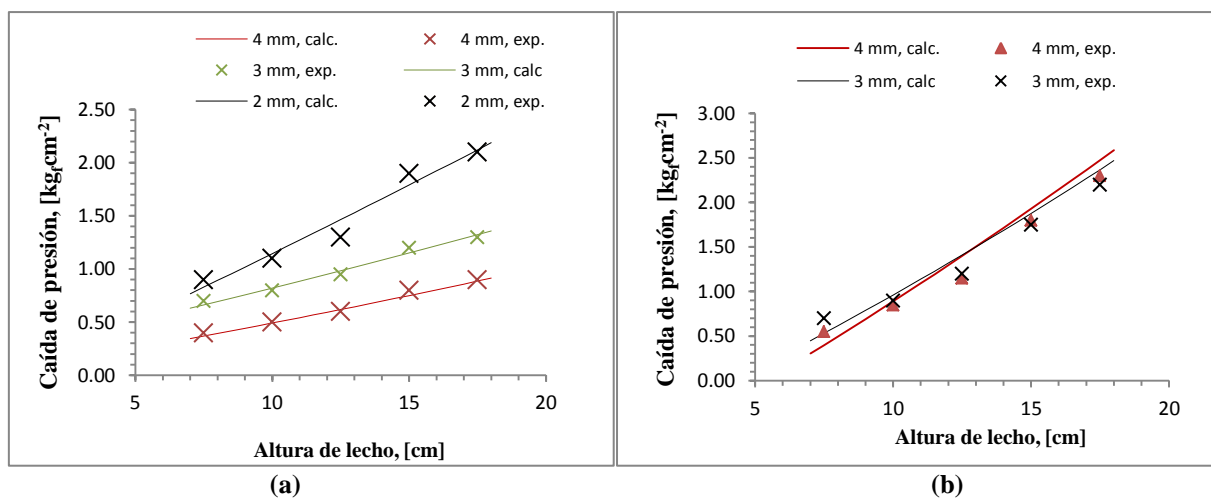
**Figura 13** - Vista en corte de las boquillas empleadas.

La pérdida de presión en la boquilla, se debe a la expansión brusca que sufre el fluido (aire) a la salida de la boquilla (c - d). Además, se observan 2 contracciones en la transición de la manguera hacia la boquilla (a - b) y en la boquilla misma (b - c).

Las características del lecho consideradas fueron:

- Diámetro nominal de partícula ( $D_p$ ) de 2,45 mm (valor medido)
- Factor de forma ( $\lambda$ ) de 1,02 [18]
- Porosidad de lecho ( $\epsilon$ ) de 0,43

La Figura 14 muestra una comparación entre los valores experimentales y calculados de la pérdida de presión global en todo el sistema, en función del diámetro de boquilla y la altura de lecho, para los dos diámetros de lecho experimentados. Se observa que la caída de presión calculada tiene un valor muy cercano al valor medido para todas las boquillas utilizadas.



**Figura 14** - Comparación entre las pérdidas de presión globales medidas y calculadas: (a) Diámetro de lecho = 7,5 cm y (b) Diámetro de lecho = 20 cm.

#### 4. CONCLUSIONES

Se ha realizado un estudio a nivel de laboratorio con el propósito de reducir el consumo de energía por unidad de masa para el proceso de remoción seca de saponinas que se lleva a cabo en un lecho fluidizado de tipo surtidor. También se ha simulado con éxito la caída de presión de aire que sucede en el sistema. Las conclusiones más importantes son:

- (a) Los factores que inciden más preponderantemente en el consumo de energía específico son: el diámetro de la boquilla, el diámetro de lecho, el tiempo de proceso y la altura de lecho, en ese orden.
- (b) A mayores diámetros de boquilla, se necesitan mayores tiempos de proceso para la remoción de saponinas hasta el 0,01% de concentración.
- (c) Cuando se utilizan boquillas de menor diámetro (1-2 mm), el movimiento de los granos de quinua es más homogéneo en lechos de diámetro menor, obteniéndose remociones satisfactorias de saponina en tiempos menores a 30 min.
- (d) Cuando se utilizan boquillas de menor diámetro (1-2 mm), el movimiento de los granos de quinua, no es homogéneo en lechos de diámetro mayor, produciéndose estancamientos en la parte lateral descendente.
- (e) Cuando se utilizan boquillas de mayor diámetro (3-4 mm), el movimiento de los granos de quinua es homogéneo en lechos de diámetro mayor, obteniéndose remociones satisfactorias de saponina en tiempos mayores a 30 min.
- (f) Para cualquier diámetro y altura de lecho, las pérdidas de masa son menores cuando se utilizan boquillas de diámetro mayor.
- (g) Para un diámetro de lecho de 20 cm, la altura de lecho estático y el diámetro de boquilla más convenientes son 12,5 cm y 3 mm, respectivamente, y un tiempo de 60 min aproximadamente, para obtener granos de 0,01 % de concentración de saponinas, lográndose el menor consumo específico de energía (0,23 kWh kg<sup>-1</sup>). Este valor es significativamente menor al obtenido en las condiciones óptimas establecidas en el estudio anterior [11] de 0,37 kWh kg<sup>-1</sup>.
- (h) Las pérdidas de masa en las condiciones anteriores son menores al 5 % (valor considerado común en los procesos convencionales por vía combinada).
- (i) Los coeficientes  $n$  y  $K$ , de la ecuación de Lama, obtenidos por regresión, a partir de datos experimentales, permiten la evaluación satisfactoria de la pérdida de presión en el lecho fluidizado en función de la altura de lecho y el diámetro de boquilla. Estos coeficientes pueden ser utilizados con una exactitud apropiada para los dos diámetros de lecho experimentados.
- (j) En general, las caídas de presión globales, para esta configuración de LFTS, son pequeñas comparadas con las observadas en el anterior estudio [11], lo cual permitiría utilizar sopladores más económicos, en lugar de compresores de más alto precio.

#### 5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. J. Koziol. "Chemical Composition and Nutritional Evaluation of Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.)." *Journal of Food Composition and Analysis*, vol. 5, pp. 35-68, 1992.
- [2] N. T. Ahamed et al. "A lesser-known grain, *Chenopodium quinoa*: Review of the chemical composition of its edible parts." *Food and Nutritional Bulletin*, vol. 19, pp. 61-71, 1998.
- [3] R. Repo-Carrasco et al. *Valor Nutricional y Usos de la Quinoa (*Chenopodium quinoa*) y de la Kañiwa (*Chenopodium pallidicaule*)*. [En línea]. Disponible en: <http://www.scribd.com/doc/12412360/Valor-Nutricional-y-Usos-de-La-Quinua-y-la-Kaniwa> [27 Septiembre 2010].
- [4] J. Ruales. "Development of an infant food from quinoa *Chenopodium quinoa* Wild." Technological aspects and nutritional consequences, Doctoral Thesis, University of Lund, Sweden, 1992.
- [5] INE Bolivia. *Estadísticas Internacionales. Comercio Exterior de Bolivia* [En línea]. Disponible en <http://www.ine.gob.bo:8082/comex/Main>. [30 de Septiembre de 2010].
- [6] R. Miranda. "Caracterización Agromorfológica de 685 Acciones de Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willdenow) Pertenecientes al Banco de Germoplasma de Granos Altoandinos del CIBREF – UTO en el CEAC." Tesis de Grado, Universidad Técnica de Oruro, Bolivia, 2010.
- [7] S. Villacorta y V. Talavera. "Anatomía del Grano de Quinoa (*Chenopodium Quinoa* Wild.)." *Anales Científicos UNA*, vol. 14, pp. 39-45, 1976.
- [8] O. Guglu-Ustundag and G. Mazza. "Saponins: Properties, Applications and Processing." *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, vol. 47, pp. 231–258, 2007.
- [9] T. Kuljanabhadgavad and M. Wink. *Biological activities and chemistry of saponins from *Chenopodium quinoa* Wild.* *Phytochem Rev.*, vol. 8, pp. 473–490, 2009.
- [10] Centro de Promoción de Tecnologías Sostenibles (CPTS) (2004). Tecnología para el beneficiado de quinua. [En línea]. Disponible en: <http://www.cpts.org/tecquinua/Tecquinua.pdf>. [10 Junio 2009].

- [11] R. Escalera et al. “Desarrollo y Desempeño de un proceso de beneficiado en seco de variedades amargas de quinua basado en la aplicación de un lecho fluidizado de tipo surtidor (LFTS).” *Investigación y Desarrollo*, vol. 1, no. 10, pp. 5-22, 2010.
- [12] C. Quiroga y R. Escalera. “Evaluación de la calidad nutricional y morfología del grano de variedades amargas de quinua beneficiadas en seco, mediante el novedoso empleo de un reactor de lecho fluidizado de tipo surtidor.” *Investigación y Desarrollo*, vol. 1, no. 10, pp. 23-36, 2010.
- [13] Instituto Boliviano de Normalización y Calidad, IBNORCA (1996). Norma Boliviana NB 683, Cereales – Quinua en grano – Determinación del contenido de saponinas – Método de la espuma.
- [14] C. Subieta et al. “Optimización del contenido de saponinas en el polvo proveniente del proceso de remoción LFTS.” *Investigación y Desarrollo*, vol. 1, no. 11, en prensa.
- [15] C. J. Geankoplis. *Transport Processes and Unit Operations*, Third Ed., New Jersey, Prentice Hall, pp. 93 -102, 1993.
- [16] A. Creus. *Instrumentación Industrial*. Séptima Ed., Barcelona, España: MARCOMBO S.A., pp.148, 2005
- [17] R. F. Lama. *Pressure Drop in Spouted Beds*, University of Ottawa, Ottawa, Tesis Magistral EC52387, 1977.
- [18] C. Condorhuamán. “Secado de granos I. Perdida de presión en lecho surtidor.” *Revista Peruana de Química y Ingeniería Química*, vol. 5, no. 1, pp. 16-22, 2002.