

INGENIERÍA QUÍMICA, MINAS GEOLOGÍA Y CIVIL

INGENIERÍA QUÍMICA Y METALURGIA

DESARROLLO DE UN PROTOTIPO PARA EL POPEO DE GRANOS DE QUINUA (*Chenopodium quinoa*) ROJA CON AIRE CALIENTE

Cipriano Mendoza Rojas

Unidad de investigación e Innovación de Ingeniería Química y Metalurgia
Programa de Investigación de Procesos Industriales - Área de Operaciones y Procesos Químicos
E-mail: cmendozar71@hotmail.com

RESUMEN

Se presenta el método de popeo innovado de los granos de quinua roja empleando la tecnología de secado flash por transporte neumático con arrastre de flujo de aire caliente a través del interior de un tubo. La materia prima utilizada es quinua roja sin lavar, ni escorificado para proteger el pericarpio que actúa como una coraza para producir el estallido de almidón gelatinizado por el incremento de la presión interna por la vaporación del agua. Para el propósito del experimento se ha diseñado y construido el equipo experimental prototipo a bajo costo. De los resultados del ensayo se demuestra que método de popeo innovado respecto al método convencional es más eficiente en cuanto a la calidad del producto expresado como la relación de expansión mayor a 4 y el porcentaje del popeo mayor a 85 %. El producto obtenido presenta una contextura uniforme. Para el popeado óptimo, la temperatura del aire caliente con flujo continuo es entre 240 – 250 °C, mayor temperatura disminuye el volumen de producción del popeo, la velocidad de transporte de la quinua debe ser menor a 5 m/s. Resultados obtenidos demuestran la factibilidad técnica de producción de alimentos de fácil consumo para satisfacer el mercado internacional con valor agregado para las empresas que exportan quinua. Basado en estos resultados actualmente la empresa exportadora de quinua está desarrollando el escalamiento del equipo para mayor volumen de producción.

Palabras clave: Popeo de quinua, relación de expansión, transporte neumático de granos, lecho fluidizado.

DEVELOPMENT OF A PROTOTYPE FOR THE POPPING OF QUINOA GRAINS (*Chenopodium quinoa*) RED WITH HOT AIR

ABSTRACT

The innovative method of popping red quinoa grains is presented using flash drying technology by pneumatic transport with hot air flow through the inside of a tube. The raw material used is red quinoa without washing or scarification to protect the pericarp that acts as a shell to produce the explosion of gelatinized starch by increasing the internal pressure by water vaporization. For the purpose of the experiment, the prototype experimental equipment has been designed and built at low cost. From the results of the test, it has been demonstrated that an innovative popping method with respect to the conventional method is more efficient in terms of the quality of the product expressed in the expansion ratio greater than 4 and the percentage of the popping greater than 85%. The product obtained has a uniform texture. For optimal popping, the temperature of the hot air with continuous flow is between 240 - 250 °C, the higher temperature decreases the volume of production of the popping. The air velocity for the transport of quinoa grains must be less than 5 m / s. Results obtained demonstrate the technical feasibility of producing easy foods consume to satisfy the international market with added value for companies that export quinoa. Based on these results, the quinoa exporting company actually is developing the equipment scaling for greater production volume.

Keywords: Popping quinoa, expansion ratio, pneumatic transport of grains, fluidized bed.

INTRODUCCIÓN

La implantación de tecnologías más eficientes en la producción de alimentos popeados con mayor valor agregado como es el caso de los granos andinos de la quinua roja se ve limitado por los diferentes factores como la poca información bibliográfica, investigación sobre equipos popeadores de granos andinos en nuestro medio, la falta de disponibilidad de equipos en el mercado nacional o internacional, todo estos factores restringen en el aparato productivo del sector industrial exportadora de quinua, limitando solo a la comercialización de la quinua como materia prima sin procesar, por falta de adaptaciones

tecnológicas de equipo y maquinaria requerida para nuestro sector industrial.

Los granos de la quinua roja popeados (reventados como palomitas de maíz), actualmente constituye como uno de los ingredientes más importantes en los alimentos snacks, especialmente en los países como Estados Unidos, Comunidad Económica Europea, Japón y otros países con alto nivel económico (Agrodata, 2016, FAO, 2014). El objetivo del presente estudio fue desarrollar un prototipo a escala planta piloto y adaptar al popeado de los granos de la quinua roja para una producción a gran escala para el sector industrial. El prototipo seleccionado fue diseñado y

construido en material de vidrio con fines de visualizar el fenómeno de popeado. Se utilizó aire caliente como agente de popeado y a su vez cumplirá tres funciones: transportar los granos, secar y popear por rápida evaporación del contenido de humedad dentro de los granos, acompañando con la gelatinización del almidón. Esta operación se realizará en pocos segundos en forma continua sin dañar sus propiedades nutricionales. El prototipo desarrollado es a nivel planta piloto y es de bajo costo. Los resultados evaluados y con parámetros operacionales optimizados serán con fines de transferir al sector productivo para construir equipos a gran escala para una producción industrial continua.

El estallido de cereales se ha practicado desde hace cientos de años. El popeo o estallido es un tipo de cocimiento de almidón, donde los granos se exponen a altas temperaturas durante breve tiempo. El estallido es un proceso en el que los granos se calientan hasta que la humedad interna se expande y explota para luego salir a través de la capa exterior del grano (Arkhipov et al., 2005). Para realizar el popeado existe diferentes métodos tales como el uso de arena caliente o sal caliente, el popeado en recipientes que pueden ser ollas de barro o sartenes, el de lecho fluidizado o el uso de microondas (Iyota H, et al 2014). Todas estas alternativas son solo a nivel a pequeña escala o artesanal. Uno de los grandes problemas que enfrenta la industria es disponer de un equipo que permita el popeo con flujo continuo y con menos pérdida del material durante el popeo, es decir encontrar las condiciones favorables bajo los cuales se alcance un popeo uniforme, con lo cual se minimice pérdidas, es decir que todos los granos de la quinua roja revienten. Para realizar este trabajo se plantea una nueva alternativa tecnológica como es el uso de secador flash tipo transporte neumático de flujo continuo y para determinar las condiciones de operación es necesario construir un equipo prototipo para estudiar la factibilidad técnica del popeo. Con este trabajo se pretende innovar el procesamiento de la quinua obteniendo nuevos productos en forma popeado especialmente de la quinua roja que el mercado internacional demanda para ser utilizado como producto instantáneo, y para el cual fue necesario identificar los problemas actuales de la operación de popeado a escala industrial, con la finalidad de plantear la alternativa que optimice el proceso de popeado mejorando sus propiedades físicas del popeado (Aleksandr A. et al, 2005).

MATERIAL Y MÉTODOS

Materia prima. Para el popeado de la quinua, como materia prima se ha seleccionado básicamente la quinua roja, la razón de esta selección se debe a que la corteza exterior (capa externa) de este tipo de quinua presenta cierta dureza, lo que favorece el popeado al reventar la superficie de la quinua por acción de la presión interna que ejerce el vapor sobrecalentado por la acción del sometimiento de los granos de quinua al calentamiento con aire por encima de 250°C, en cambio las otras variedades de la quinua como es la amarilla, la blanca o la negra no presenta esta característica, por presentar una corteza muy suave. La siguiente Figura 1 muestra la quinua roja junto a otras dos variedades como es la blanca y la negra.



Figura.1. variedades de semillas de granos de la quinua: negra, roja y amarilla.

Metodología experimental: La metodología consistió en la evaluación de las características físicas de la materia prima y popeado, así como la caracterización de hidrodinámica.

Las características físicas de la quinua están determinadas por el diámetro medio esférico (d_m), densidad aparente (ρ_a), densidad real (ρ_{real}) y porosidad (ε_o), evaluadas a partir de las siguientes expresiones:

$$diametro\ medio\ (dm) = \frac{\sum_i \left(\frac{x_i}{d_i^2} \right)}{\sum_i \left(\frac{x_i}{d_i^3} \right)} \quad (1)$$

$$\rho_a = \frac{m}{V} \quad , \quad \rho_{real} = \frac{m}{V_{real}} \quad , \quad \varepsilon_o = 1 - \left(\frac{\rho_a}{\rho_p} \right) \quad (2)$$

Las Característica hidrodinámica de la quinua roja, se evalúa a través de la **velocidad** mínima de fluidización y velocidad de fluidización completa a mediante las siguientes ecuaciones (Costa Novella et al 1985):

$$V_\infty = 2 \sqrt{\frac{d_p}{3}} \sqrt{\left(\frac{\rho_p}{\rho_f} - 1 \right) \frac{g}{f_{D\infty}}} \quad (3)$$

$$f_{D\infty} = f(\text{Re}_\infty) \quad , \quad \text{Re}_\infty = \frac{\rho_f V_\infty d_p}{\mu_f} \quad (4)$$

Para resolver esta ecuación es fundamental calcular el factor de roce fluido partícula ($f_{D\infty}$) a partir de las correlaciones para formas geométricas definidas (placas planas, cilindros, esferas). Para el caso de la esfera se ha planteado las siguientes ecuaciones:

Ley de Stokes, para valores de

$$f_{D\infty} = \text{Re}_\infty < 1,0 \quad , \quad f_{D\infty} = \frac{24}{\text{Re}_\infty} \quad (5)$$

Para

$$1,0 < \text{Re}_\infty < 1000, f_{D\infty} = \frac{24}{\text{Re}_\infty} \left[1 + 0,15 \text{Re}_\infty^{0,687} \right] \quad (6)$$

$$\text{Para} \quad 1000 < \text{Re}_\infty < 10^5, \quad f_{D\infty} = 0,44 \quad (7)$$

$$V_{\min} = \sqrt{\frac{4\varepsilon^{4,7} d_p g (\rho_p - \rho_f)}{3 f_{D\infty} \rho_f}} \quad (8)$$

Expresión que determina la velocidad mínima de fluidización. Para la fluidización completa de las partículas algunos investigadores proponen la siguiente expresión de $V_{fluid} = 2,0 V_{\min}$, y para el caso de transporte neumático, la velocidad de arrastre deberá ser: $V_{arrastre} \gg V_{\min}$

Las características físicas del popeado, determinan la calidad del popeado en base a la eficiencia del popeado, relación de expansión y el tamaño de granos no popeados, de acuerdo a las siguientes ecuaciones (Vinita Sharma, 2014):

- Porcentaje de eficiencia de popeado: es la relación del peso de grano popeado respecto al peso de grano popeado y no popeado, expresado en porcentaje.

$$\% \text{ popeado} = \frac{\text{Peso total grano popeado}}{\text{peso total grano popeado} + \text{peso grano no popeado}} \times 100 \quad (9)$$

- Relación de expansión (RE): es la relación del volumen total popeado (ml) respecto al volumen de granos de granos de quinua como materia prima expresado en volumen. La relación de expansión máxima indica una buena calidad de popeado. La relación de expansión (RI), se calcula a partir de la siguiente relación:

$$\text{Relacion de expansion (RE)} = \frac{\text{Volumen popeado (V}_2\text{)}}{\text{Volumen materia prima sin popear (V}_1\text{)}} \quad (10)$$

V_1 y V_2 se calcularon utilizando una probeta de volumen graduado, donde se colocaron las muestras sin popear (V_1) y popeado (V_2).

Equipo experimental: La figura 2, muestra el prototipo experimental de popeo, diseñado y construido con tubo de vidrio y acero inoxidable, junto con los puntos etiquetados para la medición de temperatura y velocidad del aire.

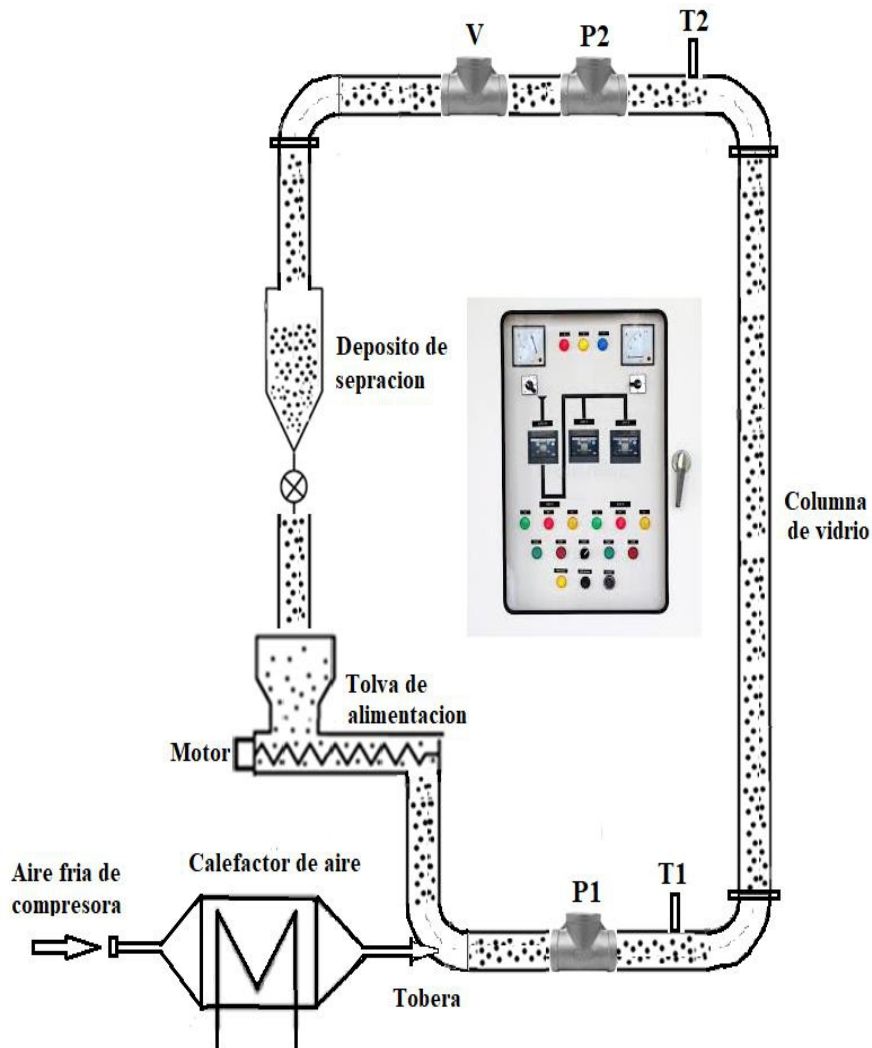


Figura 2. Esquema del equipo para el popeo de los granos de la quinua roja.

RESULTADO Y DISCUSIÓN

De acuerdo al análisis granulométrico, la quinua roja presenta un tamaño medio de 1,5 mm (Fig.3), la misma que fue verificada por el tamaño medio geométrico de (dm) = 1,48 mm).

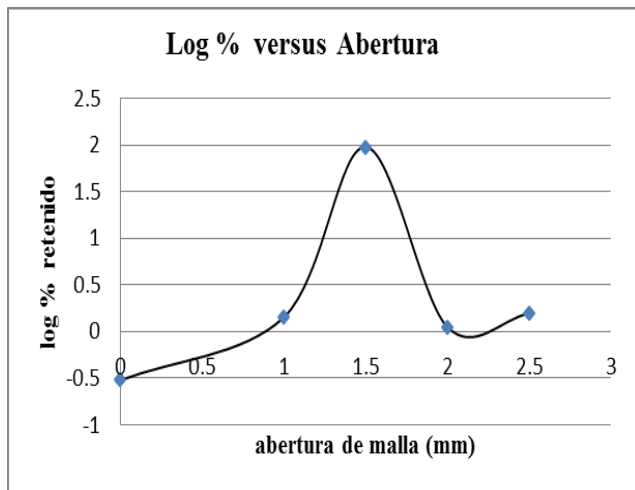


Figura 3. Resultados de análisis granulométrico

De los resultados se puede apreciar que un 95,6 % (log de 1.980458) corresponde a un diámetro medio de 1,50 mm de diámetro, valor que corrobora con el cálculo de diámetro medio aritmético 1,48 mm. Según la norma técnica peruana NTP 205.062:2009 QUINUA, el tamaño del grano entra en la categoría de mediano (mayor a 1,40 hasta 1,69 con 85 % retenido en la malla ASTM 14).

De los ensayos experimentales, la quinua roja presenta una densidad aparente promedio de $\rho_a = 766,0 \text{ kg/m}^3$, y una densidad real de la partícula de $\rho_{real} = 1103,5 \text{ kg/m}^3$, y con una porosidad de $\epsilon_o = 0,2639$. Esta porosidad corresponde a quinua seca con 12 % de humedad con un tamaño promedio medio de 1,5 mm de diámetro. Datos que fue corroborado con estudios realizados por C. Vilche, M. Gely, E. Santalla (2003). Estos resultados fueron empleados para determinar la característica hidrodinámica de la velocidad de arrastre de la quinua roja, cuyo valor calculado fue de $V_\infty = 5,8713 \text{ m/s}$. Esta velocidad de arrastre calculado viene hacer la velocidad final que alcanza una partícula cuando cae libremente a través de un fluido (aire), y las fuerzas que actúan sobre él se equilibran (fuerza de gravedad, fuerza de empuje y fuerza de arrastre). De igual manera, si la partícula es soplada con la velocidad final hacia arriba la partícula no se moverá, entonces la velocidad final puede ser tomada como la velocidad mínima para que las partículas de quinua puedan ser suspendidas en el aire.

Para una velocidad de operación mayor que la velocidad de arrastre por lo general se utiliza un factor de diseño de 1,5 la velocidad mínima de arrastre o la velocidad mínima:

$V_{oper} = 1,5(V_\infty) = 1,5 \times 5,8713 = 8,80 \text{ m/s}$, La velocidad mínima de fluidización, calculada fue de $V_{min} = 0,3627 \text{ m/s}$. Este valor representa la velocidad mínima de fluidización o velocidad incipiente de fluidización de los granos de la quinua. Una vez que se ha alcanzado la velocidad mínima de fluidización, si se sigue incrementando el caudal de aire, el

sistema estará cada vez más vigorosamente fluidizado. Si se sigue aumentando este llegará un momento en que las partículas sean arrastradas por el aire, alcanzándose lo que se denomina velocidad terminal. Si se aumenta el flujo por encima de la velocidad terminal, tiene lugar el denominado arrastre o transporte neumático de partículas, dejando de existir el lecho fluidizado.

Ensayo experimental de popeo. Con la finalidad de determinar las condiciones de operación del proceso de popeo se llevaron a cabo experimentos a dos condiciones:

1. Popeado por método tradicional
2. Popeo innovado con arrastre de aire caliente con flujo continuo

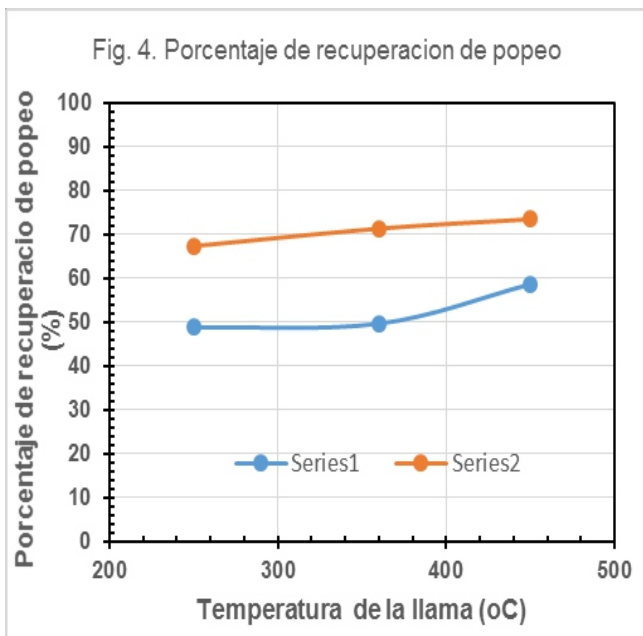
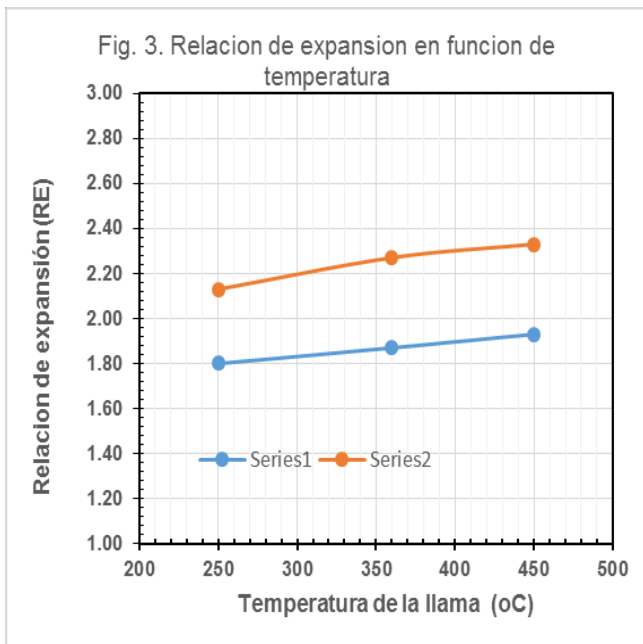
Popeado por método convencional Este ensayo se realiza con la finalidad de analizar la calidad de popeado, y la vez identificar los problemas actuales que tiene la planta procesadora de quinua durante el proceso de popeado de quinua roja por el método convencional (popeado con horno rotatorio con calentamiento indirecto), considerando las siguientes condiciones de alimentación:

- Quinua roja semi-procesada (escorificado y lavado en seco con vapor sin saponina)
- Quinua roja sin pre-procesamiento con presencia de saponina

Para realizar este experimento se utilizó un recipiente que se calienta empleando una cocina de hornilla de gas de propano, regulando la temperatura de combustión de la llama de: $T = 250 \text{ oC}$, 360 oC y 450 oC . Los resultados de este experimento sirven para analizar el efecto de la presencia del pericarpio (Coraza de la quinua) en la calidad final del popeado, en cuanto al rendimiento de popeado y relación de expansión.

Se analizó el efecto de la temperatura en el índice de expansión y en el rendimiento del popeado, tanto para los granos de quinua semi procesada (escorificada y lavado con vapor en seco) y sin semi-procesar, respectivamente. De la Fig. 3 se observa que la relación del índice de expansión (RE) del popeado se incrementa a medida que la temperatura se incrementa para ambas muestras, lo que al mismo tiempo afecta directamente en el rendimiento del popeado (Fig. 4).

De la comparación de índice de expansión (Fig 3), se observa que la muestra de la quinua semi procesada presenta un índice de expansión menor respecto a la quinua no semi procesada. Este resultado es fundamental para el análisis del papel que cumple el pericarpio (carcasa) para causar la explosión del almidón gelatinizado de granos de quinua debido al incremento de la presión interna por la vaporización del contenido del agua por efecto de la temperatura. En el caso de los granos de quinua semi procesada, por efecto del escarificado y lavado se ha dañado el pericarpio, obteniendo una baja relación de expansión, que vario en el orden de 1,80 a 1,93, con relación al popeado de quinua sin procesar, cuya relación de expansión varia en el rango de 2,13 a 2,33, esta es la razón por que se obtiene un bajo eficiencia de recuperación de popeado, ocasionando casi un 40 % de pérdida, lo que corrobora los datos de la empresa de exportadora de quinua.



Popeo por el método innovado de transporte neumático con arrastre de aire caliente en flujo continuo

El transporte neumático de flujo continuo con arrastre de aire caliente se utilizó como método innovado de popeo de quinua roja. De acuerdo a los resultados presentados en el método convencional, se ha seleccionado la quinua roja sin pre-tratamiento, es decir, quinua sin escorificado y ni lavado en seco con vapor saturado, para estas condiciones, los granos de la quinua previamente seleccionado y limpio y con un contenido de humedad que varía en el rango de 11 a 13 % base húmeda se alimentaron a través del tornillo sin fin al popeado por transporte neumático. Para la evaluación del popeado se tomaron en consideración los siguientes parámetros:

- Relación de expansión
- Eficiencia del popeado
- Temperatura del popeado

La tabla 1 presenta los resultados de datos determinados para el proceso.

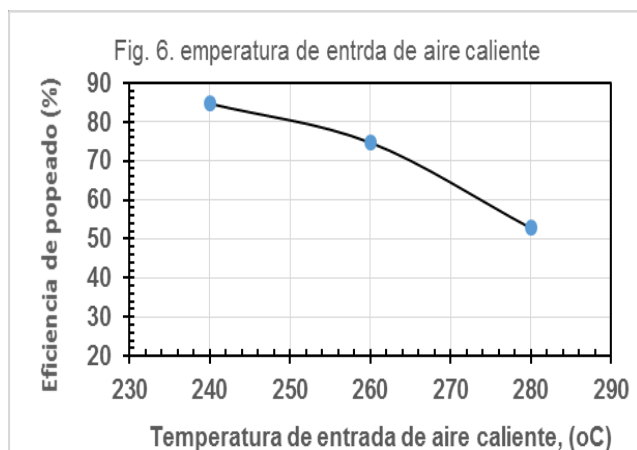
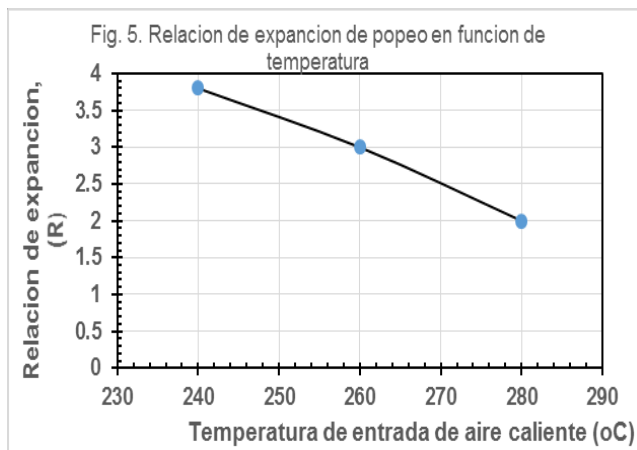
Tabla 1. Resultados de datos determinados para el proceso.

Descripción	Datos
Diámetro de tubería de vidrio	2 pulgadas OD
Longitud total de la tubería	3,0 metros
Presión de aire de la compresora	4,5 bar
Velocidad de aire a través de la tubería	4,8 m/s
Flujo de masa alimentado de quinua (g/s)	20,8 g/s

La tabla 2 resume los resultados del proceso de popeo a diferentes temperaturas de ingreso de aire caliente, visualizando estos resultados a través de las Figuras 5 y 6. De estos resultados se aprecia que se mejora la relación de expansión (Fig 5) y eficiencia de popeado (Fig. 6) a la temperatura de 240 °C, mayores a esta temperatura la relación de expansión y eficiencia de popeo disminuye.

Tabla 2. Popeado de quinua por el método innovado con arrastre de aire caliente.

No de Ensa	Condiciones de proceso					Características físicas de quinua roja			Caract. de popeo	
	Mo (g/s)	Vo (m/s)	P (Bar)	Tin. (°C)	Tout (°C)	ρ_{real} (g/ml)	ρ_{ap} (g/ml)	Porosid. (ϵ)	Relación Expans.	Rendim. popeado (%)
1	12,89	4,8	4,5	280	140	1,11	0,739	0,235	2,0	52,79
2	13,24	4,8	4,5	260	130	1,11	0,739	0,235	3,0	74,69
3	13,09	15	4,5	240	112	1,11	0,739	0,235	3,8	84,67



La figura 7 presenta la quinua roja popeada por los dos métodos. El método innovado presenta mayor tamaño de expansión y calidad uniforme respecto al método convencional. De resultados de ensayo se determina el perfil de temperatura optima de popeado se encuentra a la temperatura de 240 °C (entrada de aire caliente) y 112 °C, (salida de aire caliente). Por otro lado, no llego alcanzar la velocidad de arrastre de 8,8 m/s, logrando solo una velocidad de 4,8 m/s medido con un anemómetro, sin embargo, la quinua popeada es arrastrada a esta velocidad en vista que su densidad aparente disminuye grandemente por el estallido de almidón gelatinizada, por lo que se recomienda trabajar con velocidades de aire caliente menores a 5,0 m/s.



Figura. 7. comparación de popeado de quinua por el método convencional e método innovado.

Conclusiones

El popeo es un método de procesamiento simple y menos costoso que mejora las cualidades texturales y sensoriales de los granos de quinua roja mediante el empleo de aire caliente a través de un equipo modular diseñado y construido de tipo transporte neumático de flujo continuo.

La calidad del popeado en cuanto a sus propiedades físicas como relación de expansión y rendimiento de popeado se mejora empleado quinua roja semi-procesada (sin escorificado ni lavado en seco), de lo contrario origina la ruptura de pericarpio y no produce el estallido o el popeo del almidón gelatinizado debido a la evaporación y sobrecalentamiento de vapor de agua en el interior de los granos de quinua.

Para la quinua no semi-procesada, las propiedades físicas del popeado son bastante buenas respecto a la relación de expansión (mayor a 4 en comparación a 3 por el método convencional y la eficiencia de popeado es alto por encima de 80 %, lo que minimiza la pérdida de granos de quinua no popeadas, estas condiciones se cumplen para el rango de temperatura de aire caliente entre 240 °C (entrada) y 112 °C (salida de aire caliente). Por el método convencional se tiene una pérdida de 40 % de quinua no popeada.

El popeo con tecnología innovada tiene un gran potencial de mercado como producto de salud de valor agregado, ya que las necesidades de los consumidores están cambiando hacia alimentos convenientes y de fácil uso.

AGRADECIMIENTO

A Alejandro Tineo Morote, por su colaboración en el presente trabajo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Arkhipov A, Becker C, Bergamo D, Demtchouk V, Freddo A, Kreider, E, Lee M, Montalbano J, Richards D, So E and Wang J (2005). Accessed from <http://depts.drew.edu/govsch1/NJGSS.2005/journal/TeamPaper/T3-popcorn.pdf>.

Agrodata, (2016), “*Quinua Perú Exportación Marzo (2016)*”, <http://www.agrodataperu.com/category/quinua-exportacion>.

Aleksandr A. et al, (2005), “*Popping under Pressure: The Physics of Popcorn*”, <https://pdfs.semanticscholar.org/693b/b80895c7327949ac9ced8fba98f5f3ec2b1b.pdf>

Costa Novela, et al (1985). “*Ingeniería Química: Flujo de fluidos*”, Edit. Alhambra, España

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), (2014), “*Tendencias y perspectivas del comercio internacional de quinua*”, Santiago de Chile.

Holm J, Bjorck I, Asp N G, Sjöberg L B and Lundquist I (1985). Starch availability in vitro and in vivo after flaking,

steam-cooking and popping of wheat. *Journal of Cereal Science*, 3(3), 193-206.

Iyota H. , Konishi Y , Inoue T , Yoshida K , Nishimura N Nomura T, (2014), "*Popping of Amaranth Seeds in Hot Air and Superheated Steam*", *Drying technology: An International Journal*.
<http://www.tandfonline.com/loi/ldrt20>.

Vilche C.; Gely M.; Santalla E. (2003), "Physical Properties of Quinoa Seeds", *Biosytem Engineering*. Volume 86, Issue 1, September 2003, Pages 59-65.

Vinita Sharma, P.S. Champawat and V.D.Mudgal (2014), "Process development for puffing of Sorghum", *International Journal of Current Research and Academic review*", ISSN: 2347-3215 Volume 2 Number 1 (January, 2014) pp. 164-170.