

# Evaluación de componentes mecánicos y energéticos del secador de lecho fluidizado de la Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac

## Evaluation of mechanical and energy components of the fluidized bed dryer of the National University Micaela Bastidas de Apurímac

Fernandez Ayma, Alfredo

Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac, Av. Inca Garcilazo de la Vega, s/n° 9836741DO. Apurímac Perú

**Resumen**— El presente trabajo de investigación titulado "Evaluación de componentes mecánicos y energéticos del secador de lecho fluidizado de la Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac", fue desarrollado en la Provincia de Abancay - Apurímac, en el laboratorio de Operaciones Unitarias de la Escuela Académico profesional de Ingeniería Agroindustrial. El objetivo principal de la investigación fue determinar los elementos mecánicos que producen el gasto energético del secador que influye al elevado costo de secado. La problemática en el secador es la pérdida de energía, costos elevados y los contaminantes producidos, la Investigación desarrolló el balance energético para optimizar el tiempo de secado en el secador lecho fluidizado, JARCON, Modelo SLFT-60-240X, el método usado para la determinación de humedad es AOAC (2005) y el diseño aplicado fue el bloque completo al azar ( $22 \times 3$ ) para evaluar las variables de respuestas, manipulando el ventilador y extractor con la técnica de análisis de varianza. Los resultados más importantes fueron, el menor tiempo de secado resultó con el equipamiento auxiliar del ventilador y extractor con un tiempo promedio de 14,7 horas, también con una eficiencia térmica óptima de 48,42%. Mientras que la mayor pérdida de energía en el secador se da cuando no se utiliza ningún equipamiento auxiliar (ventilador y extractor) es de 283,9 kW-h y la menor pérdida es cuando se utiliza el equipamiento auxiliar (ventilador y extractor) siendo el consumo de energía de 44,3 kW-h. Concluyendo que con el equipamiento auxiliar fue mejor el tiempo de secado y la pérdida de energía fue menor.

**Palabras clave**— Deshidratación, elementos mecánicos, lecho fluidizado, maíz, pérdida de energía.

**Abstract**— This research work entitled "Evaluation of mechanical and energy components of the fluidized bed dryer of the National University Micaela Bastidas de Apurímac", was developed in the Province of Abancay - Apurímac, in the Unit Operations laboratory of the Professional Academic School of Agroindustrial engineering. The main objective of the investigation was to determine the mechanical elements that produce the energy consumption of the dryer that influences the high cost of drying. The problem in the dryer is the loss of energy, high costs and the pollutants produced, the research developed the energy balance to optimize the drying time in the fluidized bed dryer, JARCON, Model SLFT-60-240X, the method used for Moisture determination is AOAC (2005) and the design applied was the complete random block ( $22 \times 3$ ) to evaluate the response variables, manipulating the fan and extractor with the variance analysis technique. The most important results were, the shortest drying time resulted with the auxiliary equipment of the fan and extractor with an average time of 14.7 hours, also with an optimum thermal efficiency of 48.42%. While the greatest loss of energy in the dryer occurs when no auxiliary equipment (fan and extractor) is used is 283.9 kW-h and the lowest loss is when the auxiliary equipment (fan and extractor) is used, being the energy consumption of 44.3 kW-h. Concluding that the drying time was better with the auxiliary equipment and the energy loss was lower.

**Keywords**— Dehydration, mechanical elements, fluidized bed, corn, loss of energy.

### 1 INTRODUCCIÓN

El maíz es uno de los cultivos más importantes en la mayoría de los países, cuyo rendimiento está limitado por ataques de patógenos y de manejo de cosecha (Rodríguez et al., 2017). Siendo el sustento económico para muchos agricultores, en la actualidad el secado es tradicional para maíz, además, las temperaturas no pueden ser controladas por lo que las semillas se enfrentan a cambios drásticos de clima lo que puede afectar su fisiología y morfología (Cando, 2017); El secado, es la reducción del contenido de humedad que permite obtener productos sólidos con un bajo contenido de agua, para el almacenamiento, envasado, distribución y consumo, en la mayoría de los procesos el agua es eliminada por evaporación convectiva (Singh y Heldman, 2014; Toledo, Singh y Kong, 2018; Holdsworth, 2016); sin embargo, durante el proceso hay cambios físicos, químicos y bioquímicos en la materia prima (Ibarz y Barboza, 2014). El aire caliente se utiliza en la mayoría de los procesos de secado, un exceso de sequedad es un desperdicio de calor, el secado excesivo da como resultado un producto degradado, hay que ver los métodos de secado en el ahorro de energía en las secadoras (Mujumdar, 2015), hace que sea económicamente rentable su operación ya que en comparación con otros sistemas de secado el precio de la biomasa en muchos casos un residuo agrícola está muy por debajo de combustibles (Pineda y Ramos, 2015). El secado es un proceso de gran importancia en la producción de alimentos y controlar el contenido de humedad, la escasa capacitación de los agricultores y el desconocimiento de las técnicas adecuadas de secado y almacenamiento de granos

han dado como resultado pérdidas en la industria (Grolleaud, 2017); Las técnicas que utilizan calor, sin embargo hay que tener en cuenta la calidad de los granos ya que al ser expuestos a temperaturas de secado de entre 40, 60 y 80 °C, se produce una variación en las características fisicoquímicas especialmente el contenido de proteína que tiende a decaer a medida el tiempo de exposición a la temperatura de secado aumenta (Soares, Jorge y Montanuci, 2016). De otra parte, el secado artificial produce la transformación del grano y el procedimiento no debe afectar la calidad, ya que, de la energía utilizada en el proceso de secado de granos consume alrededor del 50 %, y tomando en cuenta factores de calidad y consumo energético (Restrepo y Burbano, 2005). El almacenamiento de cereales debe ser de 13 al 15% de humedad, para periodos de almacenamiento de hasta un año, y del 11 al 13% para periodos de más de un año; La corriente de aire caliente que actúa simultáneamente como gas fluidizante y agente de secado, la operación puede ser continua o discontinua, el sólido se soporta sobre una rejilla distribuidora constituida por una placa metálica, perforada o provista de distintos accesorios para la difusión del aire. En este sistema, el producto se suspende en el aire por todo el tiempo necesario para el secado, el movimiento del producto a través del sistema se ve reforzada por el cambio en la masa de partículas por la humedad que se evapora. La principal limitación para el proceso de secado en lecho fluidizado es el tamaño de partículas que permite un secado eficiente y se pueden mantener en suspensión con velocidad de aire menores y se secan más rápidamente (Singh y Heldman, 2014); En la actualidad existen los deshidratadores artificiales

\* Autor en correspondencia. Correo electrónico: alfredustrial@gmail.com

que generalmente trabajan con aire forzado por lo que la velocidad del aire afecta el tiempo de secado y de las propiedades físicas de secado. En los secadores existen los elementos mecánicos como cámara de combustión, ventilador de aire, extractor de aire y cámara de secado que produce contaminantes y que hay mucha pérdida de calor que depende de la temperatura interior de la cámara de secado, la pérdida de calor se manifiesta en la carcasa, material a secar, la temperatura del medio ambiente y otras pérdidas por conducción, convección, radiación, carga y descarga etc. El objetivo principal de la investigación fue evaluar los componentes mecánicos y energéticos del secador de lecho fluidizado de la Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac.

## 2 MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 MATERIALES

El presente trabajo de investigación se desarrolló en el laboratorio de Operaciones Unitarias de la Escuela Académico profesional de Ingeniería Agroindustrial de la Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac y el maíz dulce, procedente de distrito de Abancay, recolectadas (entre marzo hasta junio de 2018), que está ubicada a una altitud de 2400 msnm., Provincia de Abancay del Departamento de Apurímac.

El equipo que se uso es el secador lecho fluidizado, JARCON, Modelo SLFT-60-240X, con las características técnicas como se muestra en la tabla 1.

TABLA 1  
CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE SECADOR  
LECHO FLUIDIZADO SLFT-60-240X

Descripción	Capacidad
Motor (ventilador)	7.5 hp, 3550 rpm
Motor (extractor)	1.5 hp, 3550 rpm
Capacidad por batch	80-120 kg
Temperatura de trabajo	40-65°C
% humedad final	4-12%

Fuente: Catálogo de secador lecho fluidizado, JARCON.

Los instrumentos de medición de variables que se usaron son, psicrómetro digital IR, EXTECH Instruments, Modelo HD500, Infrared -50 a 500 °C, Type K -100 a 1372 °C. Analizador de Humedad, OHAUS, Modelo MB45, capacidad 45 g ± 0.01%, 50 a 200 °C ± 1 °C. Balanza analítica, BALANCE JR, Modelo HB-3000, capacidad min. 10g y máx. 3000 g, d=0.1g y cronometro digital, EXTECH INSTRUMENTS.

### 2.2 METODOLOGÍA

#### 2.2.1 PROPIEDADES FÍSICAS DEL AIRE

Razón de humedad del aire ( $H_a$ ). La humedad absoluta del aire, se define como la relación entre la masa de vapor de agua y la masa de aire seco en un volumen dado de mezcla (Cengel y Boles, 2015).

$$H_a = \frac{18 P_w}{29 P - P_w} \quad (1)$$

Humedad relativa (%HR). La humedad relativa del aire, se define como la razón entre la presión de vapor de agua en un momento dado y la presión de vapor de agua cuando el aire está saturado de humedad, a la misma temperatura (Cengel y Boles, 2015).

$$\%HR = 100 \frac{P_w}{P_{ws}} \quad (2)$$

Calor húmedo del aire ( $C_H$ ). Es la cantidad de calor necesario para elevar la temperatura de 1 kg de aire seco más el agua que le acompaña en 1 °K, el valor del calor específico del agua un valor aproximado suficiente para cálculos de ingeniería es:

$$C_H = C_{pas} + H_a C_w = 1,005 + 1,884 H_a \quad (3)$$

Entalpía ( $h_a$ ). La entalpía de la mezcla de aire seco y vapor de agua, es la energía del aire húmedo por unidad de masa de aire seco, por encima de una temperatura de referencia.

$$h_a = C_H(T_a - T_o) + \lambda_o H_a \quad (4)$$

Volumen específico ( $V_e$ ). El volumen específico del aire húmedo, se define como el volumen que ocupa la mezcla de aire seco y vapor de agua por unidad de masa de aire seco.

$$V_e = \left( \frac{1}{29} + \frac{H_a}{18} \right) \frac{R T_a}{P} \quad (5)$$

Ecuaciones empíricas para vapor de agua. La siguiente ecuación tipo Antoine propuesta por Wexler permite calcular la presión del vapor saturado en mbar en función de la temperatura en °C.

Para temperatura de aire de 0 a 60°C.

$$\log P_{ws} = 8,10765 - \frac{1750,285}{T_a + 235} \quad (6)$$

La presión de la localidad se puede obtener así (Owen, 2013):

$$P = P_o \cdot e^{-\frac{z}{8600}} \quad (7)$$

#### 2.2.2 MODOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Existen tres modos de transferencia de calor, en el proceso son: conducción, convección y radiación (Holdsworth, 2016).

a. Conducción. El flujo de calor es generalmente producido en materiales sólidos por conducción de acuerdo con la ley de Fourier, (Cengel y Boles, 2015; Kreith, et al. 2012).

b. Convección. La convección sea natural o forzada, la cantidad de calor transmitida Q, por convección se expresa con la ley del enfriamiento de Newton se puede escribir (Ley de Newton):

$$Q = h A_p (T_p - T_a) \quad (8)$$

Números adimensionales. En convección se emplean los siguientes números adimensionales, números de Nusselt, Prandtl, Reynolds, Grashof y Rayleigh (Kreith, et al. 2012):

Número de Nusselt (Nu). Representa la relación que existe entre el calor transferido por convección a través del fluido y el que se transferiría si sólo existiese conducción. El número de Nusselt se emplea tanto en convección forzada como natural y será:

$$Nu = \frac{h L_c}{K} = a (Gr Pr)^m \quad (9)$$

Número de Grashof (Gr). Representa la relación que existe entre las fuerzas de empuje y las fuerzas viscosas que actúan sobre el fluido, el número de Grashof sólo se utiliza en convección natural.

$$Gr = \frac{g \beta (T_p - T_a) L_c^3}{\nu^2} \quad (10)$$

Para la ecuación 10 se usa la longitud característica Lc en el caso de pared plana en sentido horizontal tenemos la longitud característica se determinó a través de la siguiente ecuación:

$$L_c = \frac{4 A_p}{p} \quad (11)$$

Número de Rayleigh ( $R_a$ ). Es función del número de Grashof y del número de Prandtl, el número de Rayleigh sólo se utiliza en convección natural.

$$R_a = Gr Pr \quad (12)$$

c. Radiación. La radiación es la energía emitida por la materia en forma de ondas electromagnéticas de los cuerpos a una temperatura arriba del cero absoluto, que puede ser descrito usando la ley de Stefan-Boltzmann (Wen Sun, 2012):

$$Q = A_p \epsilon \sigma (T_p^4 - T_a^4) \quad (13)$$

### 2.2.3 BALANCE DE MATERIA Y ENERGÍA DE UN SECADOR DE LECHO FLUIDIZADO

Balance de energía en una superficie. Balance de energía para la superficie exterior de una pared del secador (Owen, 2013):

$$Q_{cr} = Q_c + Q_r \quad (14)$$

Balance de materia del agua. El cambio en el contenido de agua en el sólido con el tiempo que ocurre en el volumen de control está asociado a la transferencia de agua desde el sólido al aire (Singh y Heldman, 2014; Wernecke y Wernecke 2014), el flujo másico del aire necesario en los balances de humedades en el secador es:

$$m_a = \frac{m_p(H_{pe} - H_{ps})}{H_{as} - H_{ae}} \quad (15)$$

El flujo másico del aire húmedo en la salida del secador está dado por:

$$m_a = \frac{v_a A_s}{V_{ea}} \quad (16)$$

Balance de energía. El cambio en la entalpía del sólido con el tiempo, que ocurre en el volumen de control es igual a la energía procedente de la transferencia de energía convectiva desde el aire hacia el sólido menos la energía requerida para la evaporación del agua asociada a los granos.

$$m_a h_{ae} + m_p h_{pe} + Q_g = m_a h_{as} + m_p h_{ps} + Q_p \quad (17)$$

La entalpía del producto húmedo se calcula con la siguiente ecuación:

$$h_p = C_{pss}(T_m - T_0) + H_p C_{pH_2O}(T_m - T_0) \quad (18)$$

Balance de energía en la cámara de secado de lecho fluidizado. Realizando el balance de energía, en el cámara de secado el calor entregado por el gas debe proporcionar energía al aire, al producto y las pérdidas de calor por convección y radiación, mientras que en la cámara de combustión el calor entregado por el gas debe proporcionar el calor al aire, en los gases de la combustión y para ambos cámaras se considera otras pérdidas de calor como se muestra en la figura 1.

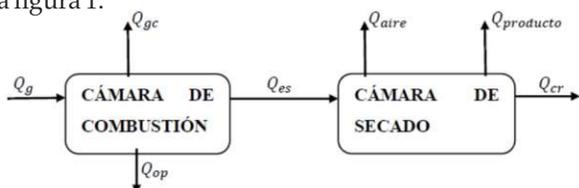


Figura 1. Diagrama de flujo de pérdida de calor en el secador

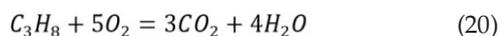
El calor entregado por el aire caliente hacia el secador para el calentamiento del aire, producto y pérdidas de calor según el balance de energía solo en la cámara de secado tenemos:

$$Q_{es} = m_a(h_{as} - h_{ae}) + m_p(h_{ps} - h_{pe}) + Q_{cr} \quad (19)$$

### 2.2.4 COMBUSTIÓN

La combustión es generalmente considerada como la liberación controlada de calor y energía a partir de la reacción química entre un combustible y un oxidante (Merker, et al. 2012).

Cálculo de la relación estequiométrica de aire-combustible. La combustión del propano en una reacción química estequiométrica de aire combustible es la siguiente reacción:



Los productos de la combustión resultan ser solo gases inertes (teóricamente), T flama adiabática = 2330 °K.

Balance de energía. El gas propano teóricamente produce una energía con un poder calorífico de 46 296 kJ/kg. El flujo de calor suministrado por el gas propano es de:

$$Q_g = P_c m_g \quad (21)$$

Los valores usados para la entalpía de formación y los calores específicos son las siguientes:

$$\Delta h_{f_{C_3H_8}} = -24\ 808,2 \text{ cal/gmol}; \Delta h_{f_{CO_2}} = -94\ 046,5 \text{ cal/gmol}$$

$$\Delta h_{f_{H_2O}} = -68\ 315,8 \text{ cal/gmol}$$

$$C_{p_{C_3H_8}} = 0,369 \text{ cal/g } ^\circ\text{C}; C_{p_{CO_2}} = 0,199 \text{ cal/g } ^\circ\text{C}; C_{p_{H_2O}} = 1,0 \text{ cal/g } ^\circ\text{C};$$

$$\text{y } C_{p_{N_2}} = 0,248 \text{ cal/g } ^\circ\text{C}.$$

Calor de gases de la combustión es en función molar:

$$Q_{gc} = (3nM_{CO_2}C_{p_{CO_2}} + 4nM_{H_2O}C_{p_{H_2O}} + 8,81nM_{N_2}C_{p_{N_2}})(T_{sg} - T_a) \quad (22)$$

Calor de gases de la combustión es en función masa:

$$Q_{gc} = (m_{CO_2}C_{p_{CO_2}} + m_{H_2O}C_{p_{H_2O}} + m_{N_2}C_{p_{N_2}})(T_{sg} - T_a) \quad (23)$$

Análisis de energía total en el secador. Al balancear la energía en todo el sistema global en la cámara de combustión como se muestra en la figura 1, las otras pérdidas de calor en el secador y conociendo el flujo de calor teórico suministrado por el gas propano  $Q_g$  es de 5844,9 W tenemos:

$$Q_{op} = Q_g - (Q_{gc} + Q_{es}) \quad (24)$$

### 2.2.5 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

El diseño factorial de  $2^2 \times 3$  con un total de 12 pruebas experimentales, los factores que se consideró son: Ventilador (sin ventilación y con ventilación), y Extractor de aire (sin extractor y con extractor). El término lineal del modelo de regresión múltiple se empleó la ecuación 25 es función a los parámetros desconocidos  $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$ ,  $\beta_0$  es la ordenada al origen, y  $\beta_j$ , mide el cambio esperado en Y por cambio unitario en  $X_j$ , por ello se requiere un modelo de regresión (Montgomery, 2012):

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_{12} X_1 X_2 + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{22} X_2^2 + \epsilon \quad (25)$$

Para el procesamiento de datos se usó software estadístico Sthtatgrafics Centurión XVII versión 16.1.18, para estudiar el modelo se usó el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y coeficiente de determinación ajustado ( $R_{aj}^2$ ) son deseables valores próximos a 1 (Gutiérrez y De la vara, 2012).

## 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1 TIEMPO DE SECADO

Los granos frescos contienen aproximadamente 68,7% de agua y la humedad de equilibrio aproximado de los granos es de 12,5% y el tiempo de secado de los tratamientos fue, ventilador de 16,8 h, ventilador y extractor de 14,7, extractor de 34,0 h y sin extractor ni ventilador de 50,2 h respectivamente.

### 3.2 ANÁLISIS DE ENERGÍA EN LA CÁMARA SE SECADO

#### a. Determinación de flujo de aire necesario para el secado.

La localidad donde se realizó la investigación está a 2581msnm, con una temperatura promedio de 18,3 °C y humedad relativa promedio de 37,6% dentro del laboratorio de operaciones unitarias. Las propiedades psicrométricas necesarias fueron calculadas usando las ecuaciones 1, 2, 3, 4 y 5 por métodos analíticos resultando la humedad del aire de  $H_{ae} = 0,00671 \text{ kg H}_2\text{O/kg a.s.}$ , la entalpía del aire  $h_{ae} = 35,42 \text{ kJ/kg}$  y el volumen específico del aire ambiente es  $V_e = 1,1403 \text{ m}^3/\text{kg a.s.}$

De la ecuación 15, la masa inicial de secado de maíz fue de 5kg con 68,7% de humedad en base húmeda y el contenido de materia seca es de 1,57 kg s.s. Considerando los valores constantes la humedad promedio del ambiente  $H_{ae} = 0,00671 \text{ kg H}_2\text{O/kg a.s.}$  y la humedad final del producto seco  $H_{ps} = 0,143 \text{ kg H}_2\text{O/kg a.s.}$

En la tabla 2, se muestra el aire mínimo necesario considerando los valores promedios de tiempo de secado.

**TABLA 2**  
**FLUJO DE AIRE NECESARIO PARA EL SECADO DE MAÍZ**

Tratamientos	$T_{as}$ °C	%HR <sub>as</sub>	$H_{as}$ kgH <sub>2</sub> O/kg a.s.	$H_{pe}$ kgH <sub>2</sub> O/kg s.s.	$m_a$ kg a.s./h
Ventilador	32,6	31,3	0,0132	2,20	29,62
Ventilador y extractor	35,5	29,8	0,0148	2,19	27,02
Extractor	33,4	27,6	0,0122	2,20	17,30

Fuente: Ecuación 1 y 15.

**b. Determinación de pérdidas de energía en la cámara de secado.**

El flujo másico del aire real, se usó el anemómetro para medir la velocidad de salida del aire real, el área de salida de aire húmedo de 56 cm<sup>2</sup>, y el flujo másico impulsado por ventiladores se calcula usando la ecuación 16, los resultados se muestran en la tabla 3.

**TABLA 3**  
**FLUJO MÁSIICO DEL AIRE IMPULSADO Y LA TEMPERATURA PROMEDIO**

Tratamiento	$v_a$ (m/s)	$V_{ea}$ (m <sup>3</sup> /kg a.s.)	$m_a$ (kg a.s./h)	$T_p$ (°C)	$T_{media}$ (°C)
Ventilador	11	1,179	188,09	29,4	23,9
Ventilador y extractor	13	1,223	214,29	30,7	24,5
Extractor	12	1,210	199,93	29,1	23,7

Fuente: Ecuación 16 y Laboratorio de Operaciones Unitarias.

El área de la cámara de secado es de 7,3 m<sup>2</sup>, la dimensión característica se calculó de la ecuación 11 y como resultado fue 3,12 m. En la tabla 4, se determina el coeficiente convectivo, para determinar pérdida el calor del secador. Los valores de número de Prandtl para el aire son de 0,71 y los valores de coeficientes de número de Grashof  $a = 0,13$  y  $m = 1/3$  son constantes para los tratamientos, para determinar el número de Grashof se usó las ecuaciones 9, 10 y 11 como se muestra en la tabla 4.

**TABLA 4**  
**VALORES DE PROPIEDADES DEL AIRE Y COEFICIENTE CONVectivo EXTERNO**

Tratamientos	$\beta \times 10^{-3}$ °K <sup>-1</sup>	$\rho$ kg/m <sup>3</sup>	$K$ W/m <sup>2</sup> K	$\mu \times 10^{-6}$ Pa.s	$Ra$ $\times 10^{10}$	$Nu$	$h$ (W/m <sup>2</sup> °C)
Ventilador	3,37	1,150	0,0254	18,412	3,09	407,94	3,29
Ventilador y extractor	3,36	1,147	0,0254	18,439	3,41	421,57	3,43
Extractor	3,37	1,150	0,0254	18,404	3,01	404,39	3,29

Fuente: Ecuación 9 y 12.

En la tabla 5, se determinó la transferencia de calor por convección con la ecuación 8, para la radiación la ecuación 13 considerando el material de la cámara de acero inoxidable AISI 304 a 230C con la emisividad  $\epsilon$  de 0,28, las pérdidas de calor por convección y radiación  $Q_{cr}$  se calculó con la ecuación 14.

**TABLA 5**  
**FLUJO DE CALOR PERDIDO POR CONVECCIÓN Y RADIACIÓN**

Tratamientos	Q convección (W)	Q radiación (W)	$Q_{cr}$ (W)
Ventilador	266,59	134,65	401,24
Ventilador y extractor	310,48	151,42	461,90
Extractor	259,38	130,81	390,19

Fuente: Ecuación 8; 13 y 14.

**c. Balance de energía en la cámara de secado de lecho fluidizado**

En la tabla 6, se determinó el flujo de calor entregado a la cámara de secado, considerando el flujo másico  $m_a$  impulsado por el aire en el secador de muestra en la tabla 3, la entalpía de entrada del aire fresco se considera a 18,3 °C de  $h_{ae}$

es de 35,42kJ/kg a.s. se calcula con la ecuación 4, el flujo másico  $m_p$  de maíz se determina con la cantidad de sólidos, y la entalpía del sólido húmedo se calcula con la ecuación 18, considerando  $C_{pss}$  la capacidad calorífica del sólido seco (2 kJ/kg s.s. °C),  $C_{pH_2O}$  la capacidad calorífica del agua (4,18 kJ/kg H<sub>2</sub>O °C) y  $T_o$  de 0°C. Reemplazando en la ecuación 19 donde los valores de  $Q_{es}$  se muestra en la tabla 6.

**TABLA 6**  
**FLUJO DE CALOR ENTREGADO A LA CÁMARA DE SECADO**

Tratamientos	$h_{as}$ (kJ/kgas)	$T_{ps}$ (°C)	$m_p$ (kg ss/h)	$h_{ps}$ (kJ/kg ss)	$h_{pe}$ (kJ/kg ss)	$Q_{es}$ (W)
Ventilador	66,594	35,1	0,0935	91,18	204,89	2027,04
Ventilador y extractor	73,705	36,9	0,1068	95,86	204,12	2737,60
Extractor	52,380	33,7	0,0462	87,54	204,89	1328,91

Fuente: Ecuación 4; 18 y 19.

**3.3 ANÁLISIS DE ENERGÍA EN LA CÁMARA DE COMBUSTIÓN**

El consumo del gas propano fue de 0,4545 kg/h (245,96 mol aire/h). En la tabla 7, se muestra el balance de número de moles y masa, donde el flujo másico de los gases emitido por el generador fue de 7,549 kg/h, entonces el flujo másico de CO<sub>2</sub> emitido por la cámara es de 1,364 kg/h y la cantidad de agua emitida es de 0,744 kg/h.

**TABLA 7**  
**NÚMERO DE MOLES Y MASA DE REACTIVOS Y PRODUCTOS**

Componentes	Moles (mol)	Peso molecular (g/mol)	Masa (kg)	Flujo másico (kg/h)
<b>Reactivos</b>				
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	227,29	44	10,00	0,455
O <sub>2</sub>	1 136,46	32	36,37	1,653
N <sub>2</sub>	4 275,32	28	119,71	5,441
<b>Productos</b>				
CO <sub>2</sub>	681,87	44	30,00	1,364
H <sub>2</sub> O	909,16	18	16,37	0,744
N <sub>2</sub>	4 275,32	28	119,71	5,441
Total	5 866,35		166,08	7,549

Fuente: Ecuación 20.

Balance de energía. Reemplazando en la ecuación 21  $Q_{gs} = 46 296 \text{ kJ/kg} * 0,4545 \text{ kg/h} = 21 041,5 \text{ kJ/h} = 5 844,9 \text{ W (J/s)}$ . En la tabla 8, se muestra la pérdida de calor en gases de la combustión.

**TABLA 8**  
**PÉRDIDA DE CALOR EN GASES DE COMBUSTIÓN**

Tratamientos	t (h)	$T_{sg}$ (°C)	$Q_{gc}$ (kcal)	$Q_{gc}$ (W)
Ventilador	16,8	35,4	1086,36	75,08
Ventilador y extractor	14,7	36,7	1168,95	92,33
Extractor	34,0	101,3	5272,99	180,07
Sin ventilación ni extractor	50,2	150,0	8366,90	193,52

Fuente: Ecuación 23.

**3.4 ANÁLISIS DE ENERGÍA TOTAL EN EL SECADOR**

En la tabla 9, resume todas las pérdidas de calor en la cámara de secado y de combustión.

**TABLA 9**  
**PÉRDIDAS DE CALOR EN LA CÁMARA DE SECADO Y COMBUSTIÓN**

Tratamientos	t(h)	$Q_{cr}$ (W)	$Q_{gc}$ (W)	$Q_{es}$ (W)	$Q_{op}$ (W)	Eficiencia secador (%)
Ventilador	16,8	401,24	75,08	2027,04	3742,78	35,96
Ventilador y extractor	14,7	461,90	92,33	2737,60	3014,97	48,42
Extractor	34,0	390,19	180,07	1328,91	4335,92	25,82
Combustión de gas	50,2		193,52		5651,38	3,65

Fuente: Ecuación 23 y 24.

La tabla 9, muestra que el calor perdido en la cámara de combustión se produce cuando solamente funciona el quemador de gases de 193, 52 W y seguido por el extractor de 180, 07 W y posteriormente cuando funciona el ventilador y

extractor. La pérdida de energía mayor es cuando solamente funciona la cámara de combustión de 5651,38 W seguido de extractor de aire 4335,92 W y posteriormente en ventilador 3742,78 W y finalmente cuando solamente funciona el ventilador y extractor con un 3014,97 W se realiza el diagrama de barras para interpretar mejor las pérdidas de calor como se muestra en la siguiente figura 2.

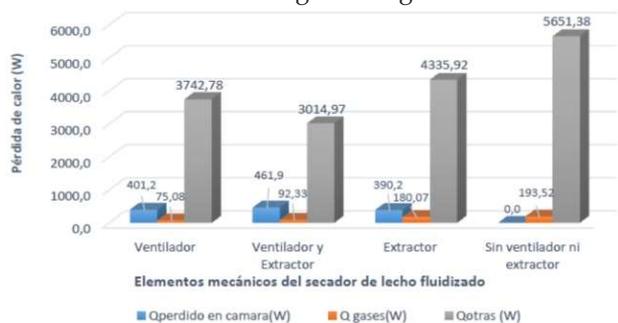


Figura 2. Pérdida de calor v/s Elementos mecánicos

En la figura 3, representa la pérdida de energía total en primer lugar ocupa es en la cámara de combustión de cuando no hay funcionamiento del ventilador ni extractor con 283,9 kW-h y seguido del extractor del aire de húmedo es de 147,6 kW-h y seguido de ventilador con 62,9 kW-h y finalmente el ventilador y extractor de 44,3 kW-h en la siguiente figura 3.

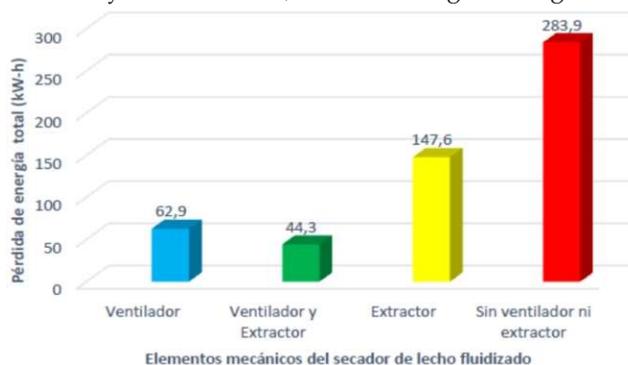


Figura 3. Pérdida de energía total v/s Elementos mecánicos

Según el análisis de varianza para la variabilidad de pérdida de energía, donde los 3 efectos tienen un valor-P menor que 0,05, indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95,0%, que el R-Cuadrada fue de 99,88% y el R-cuadrada ajustada de 99,78%.

La ecuación es de regresión lineal múltiple que se ha ajustado a los datos según el modelo de la ecuación 28 es la siguiente:

$$PE = 134,66 - 81,06V - 38,72E + 9,44VE \quad (26)$$

Dónde, PE= pérdida de energía V = Ventilación y E = Extractor. La ecuación 26 tiene valores reales y nos muestra la siguiente superficie de respuesta.

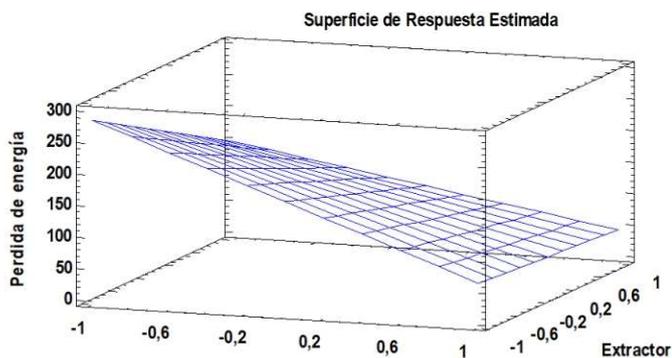


Figura 4. Superficie de respuesta de pérdida de energía

Optimizando la ecuación 26 y se produce un máximo en la pérdida de energía con un valor óptimo de 283,887 kW-h, este valor óptimo indica que hay más pérdida de energía cuando no se usa ventilador ni extractor del secador.

Los efectos principales para la pérdida de energía, muestra en la figura 5, muestra la combinación de los niveles de los factores, la cual maximiza pérdida de energía sobre la región indicada.

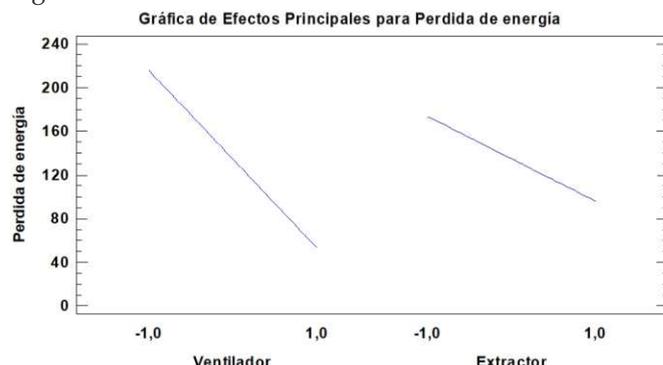


Figura 2. Gráfico de efectos principales para pérdida de energía

En el gráfico se puede observar que mayor pérdida de energía existe cuando no funciona el ventilador y que disminuye con el aumento de ventilación, con respecto al extractor de aire húmedo mayor pérdida de energía existe cuando no se extrae el aire húmedo y que disminuye con el aumento de la extracción del aire húmedo.

## 4 CONCLUSIONES

Se ha evaluado pérdidas de calor en la cámara de secado y de combustión de gas propano, considerando otras pérdidas por conducción en materiales y accesorios de construcción del secador y de la materia prima utilizada, donde se concluye que las mayores pérdidas fueron cuando no se usa el equipamiento auxiliar de 5651,38W y las menores pérdidas de calor son cuando están funcionando el extractor y el ventilador con 3014,97W. La mayor pérdida de energía en el secador se da cuando no se utiliza ningún equipamiento auxiliar (ventilador y extractor) el cual es de 283,9 kW-h y la menor pérdida es cuando se utiliza el equipamiento auxiliar (ventilador y extractor) siendo el consumo de energía de 44,3 kW-h y la mayor eficiencia del secador fue con equipamiento auxiliar del ventilador y extractor de 48,42%.

## 5 SIMBOLOGÍA

Símbolo	Magnitud	Unidad
$A_p$	Área de la pared	$m^2$
$A_s$	Área de la sección de la salida del aire	$m^2$
$C_H$	Calor húmedo del aire	$kJ/kg \text{ a.s. } ^\circ K$
$C_p$	Calor específico a presión constante	$kJ/kg^\circ K$
$C_{pas}$	Capacidad calorífica del aire seco	$kJ/kg \text{ a.s. } ^\circ K$
$C_{pH_2O}$	Capacidad calorífica del agua	$kJ/kg \text{ H}_2\text{O } ^\circ C$
$C_{pss}$	Capacidad calorífica del sólido seco	$kJ/kg \text{ s.s. } ^\circ C$
$C_w$	Calor específico del vapor de agua	$kJ/kg \text{ H}_2\text{O}^\circ K$
$g$	Aceleración de la gravedad	$m/s^2$
$Gr$	Número de Grashof	Adimensional
$h$	Coefficiente de convección	$W/m^2^\circ K$
$h_a$	Entalpia del aire	$kJ/kg \text{ a.s.}$
$h_p$	Entalpia del producto húmedo	$kJ/kg \text{ s.s.}$
$H_a$	Humedad absoluta del aire	$kg \text{ H}_2\text{O} / kg \text{ a.s.}$
$H_p$	Humedad en base seca del producto	$kg \text{ H}_2\text{O} / kg \text{ s.s.}$
$L_c$	Longitud característica	$m$
$m_a$	Caudal de aire seco	$kg \text{ a.s.} / h$
$m_g$	Flujo másico del gas propano	$kg/h$
$m_p$	Caudal de producto en base seca	$kg \text{ s.s.} / h$
$M$	Peso molecular	$g/mol$
$n$	Número de moles	$mol$
$Nu$	Número de Nusselt	Adimensional
$p$	Perímetro de la pared plana	$m$

$P$	Presión atmosférica local	atm
$P_c$	Poder calorífico del gas	kJ/kg
$P_0$	Presión a nivel del mar	1 atm
$Pr$	Número de Prandtl	Adimensional
$P_w$	Presión parcial del vapor de agua	atm
$P_{ws}$	Presión parcial de vapor saturado	atm
$Q$	Flujo de calor	W
$Q_{cr}$	Pérdidas calor convección y radiación	W
$Q_{es}$	Calor entregado al secador por el gas	W
$Q_g$	Flujo de calor suministrado de propano	W
$Q_{gc}$	Calor perdido de la combustión	W
$Q_{op}$	Otras pérdidas de calor en el secador	W
$Q_p$	Pérdidas de calor	W
$R$	Constante de los gases ideales	atm.m <sup>3</sup> /mol.kg. °K
$R_a$	Número de Rayleigh	Adimensional
$T$	Temperatura	°C
$T_a$	Temperatura del aire	°C
$T_m$	Temperatura de maíz	°C
$T_0$	Temperatura de referencia	0°C
$T_p$	Temperatura en la pared	°C
$T_{sg}$	Temperatura de salida de combustión	°C
$v_a$	Velocidad del aire	m/s
$V_e$	Volumen específico	m <sup>3</sup> /kg a.s.
$V_{ea}$	Volumen específico del aire de salida	m <sup>3</sup> /kg a.s.
$Z$	Altura sobre el nivel del mar	m

### SÍMBOLOS, LETRAS GRIEGAS

Símbolo	Magnitud	Unidad
$\beta$	Coefficiente de expansión volumétrica	1/°K
$\epsilon$	Emisividad	Adimensional
$\mu$	Viscosidad dinámica	Pa. s
$\lambda_o$	Calor latente del agua a 0°C	kJ/kg
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann	W/(m <sup>2</sup> °K <sup>4</sup> )
$\nu$	Viscosidad cinemática	m <sup>2</sup> /s

### SUBÍNDICES

*e* es entrada  
*s* es la salida.  
*a* y *m* son constantes

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A.O.A.C. (2005). Official Methods of Analysis. Association of Official Analytical Chemists, Washington, USA.

Cando, D. A. P. (2017). "Evaluación de la viabilidad y calidad de la semilla de maíz (Zea mays, l), tras diferentes métodos de secado en salache –latacunga –cotopaxi 2017".

Cengel, Y.; Boles, M. (2015). Termodinámica. México: McGraw-Hill.

Grolleaud, M. (2017). Pérdidas postcosecha: un concepto mal definido o mal utilizado. Obtenido de FAO: <http://www.fao.org/docrep/004/AC301S/ac301s00.htm#Índice>

Gutierrez, H.; De la vara, R. (2008). Análisis y diseño de experimentos. México: MCGRAW - HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. de C.V.

Holdsworth, S. D.; Simpson, R. (2016). Tratamiento térmico de los alimentos envasados. Washington State University USA: Springer Cham Heidelberg.

Ibarz, A. & Barboza, G. (2014). Operaciones Unitarias en la Ingeniería de Alimentos. México: Ediciones Mundi-Prensa.

Kreith, F.; Manglik, R. M.; Bohn, M. (2012). Principios de Transferencia de calor. USA: Cengage-Learning.

Merker, G. P.; Rudiger, T.; Schwarz, C. (2012). Combustion Engines Development. London New York: Springer Heidelberg Dordrecht.

Montgomery, D. (2012). Diseño y análisis de Experimentos. México: Limusa, S.A.

Mujumdar, A. S. (2015). Manual de secado industrial. Boca Ratón Londres Nueva York: CRC Press.

Owen, M.S. (2013). ASHRAE Handbook- Fundamentals, La investigación ASHRAE USA.: Copyrighted Materials.

Pineda, J., & Ramos, C. (2015). Diseño de un sistema continuo de secado de maíz para la empresa Agropecuaria Campo Verde. 143. Retrieved from <http://repositorio.unac.edu.pe/bitstream/handle/UNAC/399/T.660.2.P59.pdf?sequence=3&isAllowed=y>

Restrepo, Álvaro Hernán y Burbano, Juan Carlos. (2005) "Disponibilidad térmica solar y su aplicación en el secado de granos". Revista Scientia et Technica, vol. 12, No. 27 (abril), pp. 127-132.

Rodríguez, T., Noval, R., Noval-, D., En, A., Nutrición, L. A., Maíz, D. E. L., ... De, B. M. (2017). alternativas en la nutrición del maíz transgénico fr-b t 1 de (zea mays l.): respuesta en crecimiento, desarrollo y producción. Cultivos Tropicales, 38(4), 146–155.

Singh, P. & Heldman, D. (2014). Introducción a la Ingeniería de los Alimentos. Zaragoza – España: Editorial Acibia, S.A.

Soares, M., Jorge, L., & Montanuci, F. (2016). Drying kinetics of barley grains and effects on the germination index. Food Science and Tecnology, 638-645.

Toledo, R. T.; Singh, R. K.; Kong, F. (2018). Fundamentals of food process engineering (No. 664 T65 1980.). New York: Van Nostrand Reinhold.

Wen Sun & By Da. (2012). Thermal food processing. London New York: Edición CRC Press. Boca Ratón.

Wernecke, R. & Wernecke, J. (2014). Humedad industrial y Medición-Una guía práctica. Alemania: Edición, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.

