



Universidad Mayor de San Andrés  
Facultad de Ingeniería  
Carrera de Ingeniería Industrial



# REVISTA INDUSTRIAL 4.0

ISSN 2958-017x

Edición Impresa Nro. 9  
Junio 2024

## PRESENTACIÓN

El Revista Industrial 4.0, florece en su novena edición digital, en cinco años de fructífera labor de publicación de artículos de investigación, desarrollo tecnológico e innovación. La plataforma de la Carrera de Ingeniería Industrial, luce más que nunca como una palestra de la producción científica, que busca mostrar a la sociedad y al mundo, los ribetes de la generación de conocimiento de hombres y mujeres profesionales, que indagan nuevas vetas del saber.



M. Sc. Ing. Fernando Sanabria Camacho  
Director Instituto Investigaciones Industriales

Hoy más que nunca la academia necesita ser protagonista, en un contexto en el que la humanidad, busca soluciones a sus múltiples problemas de subsistencia. El propio desarrollo tecnológico, ha despegado sin medir consecuencias, efectos e impactos de tipo social y ambiental. La variable económica parece ser la que prevalece en todo momento, aunque carente de la consideración de las previsiones del riesgo. Por ello, es vital que la academia fortalezca sus instrumentos de gestión de la ciencia, tecnología e innovación, con visión de pertinencia y sostenibilidad.

Dicho proceso se consolida con la fase culminante de la difusión y transferencia de los resultados intermedios y finales, las lecciones aprendidas, los hallazgos, las innovaciones y el potencial de esperanza que los investigadores, deben mostrar y compartir. Por ello, la importancia de la oportunidad que la Revista Industrial 4.0 ofrece a la comunidad académica y científica de ingeniería industrial y las disciplinas complementarias. Por el impulso demostrado, sin duda, ocupará el sitio de las revistas especializadas indexadas de Latinoamérica, en el corto plazo.

*M.Sc. Ing. Fernando Sanabria Camacho*  
**Director Instituto Investigaciones Industriales**



**Universidad Mayor de San Andrés  
Facultad de Ingeniería  
Carrera de Ingeniería Industrial**

**Dra. María Eugenia García Moreno  
Dr. Tito Estévez Martini  
Ing. Freddy Gutierrez Barea  
Ing. Miguel Muñoz Black  
Ing. Franz José Zenteno Benítez**

**Rectora  
Vicerrector  
Decano Facultad de Ingeniería  
ViceDecano Facultad de Ingeniería a.i.  
Director de Carrera Ingeniería Industrial**

**Revista Industrial 4.0  
Edición Impresa N° 9 - Junio 2024  
Impresa: ISSN 2958-017X  
En Línea: ISSN-L 2958-0188**

**Comite Editor:  
Ing. Mónica Lino Humerez  
Ing. Grover Sanchez Eid  
Ing. Fernando Sanabria Camacho**

**Diseño Versión Impresa & web:  
Ing. Enrique Orosco Crespo**

**Imagen Tapa:  
Carrera de Ingeniería Industrial**

**Imprenta:  
Walking Graf**

**Depósito Legal:  
4-3-68-20**

**Web:  
<https://industrial.umsa.bo/revistaindustrial-40>  
Email:  
[revistaindustrial4.0@umsa.bo](mailto:revistaindustrial4.0@umsa.bo)**

**Av. Mcal. Santa Cruz N° 1175, Plaza del Obelisco  
Mezzanine, Edificio Facultad de Ingeniería  
TEI. 2205000-2205067, Int. 1402  
Campus Universitario, Cota Cota - calle 30**

# DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SECADOR DE BANDEJAS A NIVEL BENCH SCALE PARA EL SECADO DE HOJAS DE QUINUA EN LA PLANTA PROCESADORA DE CEREALES DEL GOBIERNO AUTÓNOMO MUNICIPAL DE ESCOMA

**Boris I. Párraga Andrade**  
[borisparraga@gmail.com](mailto:borisparraga@gmail.com)  
[ORCID:0000-0002-1690-806 X](https://orcid.org/0000-0002-1690-806X)

**Reyna B. Mamani Villca**  
[reynabasiliam@gmail.com](mailto:reynabasiliam@gmail.com)  
[ORCID:0009-0001-4073-8929](https://orcid.org/0009-0001-4073-8929)

Recibido: 27 de abril; aprobado: 28 de junio

**RESUMEN:** Se fortificó la harina de trigo, procesada en la Planta de Cereales del municipio de Escoma, adicionando 10% de fortificante de hojas de quinua seca, logrando mejorar el contenido proteico de la harina desde 6.8% hasta 8.5%. Se determinó las variables más influyentes en el proceso de secado, siendo la temperatura de 55[°C], la velocidad de aire de 2.21 [m/s] y el tiempo de 2h y 33 min. El diseño del equipo se lo realizo mediante escalamiento por analogía geométrica, se calculó un flujo de aire de 12.48  $\left[\frac{m^3}{min}\right]$  y una potencia de 7.09[kW] para el secador a escala bench. Se planteó un modelo matemático establecido a partir de balances másicos y energéticos, el cual resulta un conjunto de 10 ecuaciones diferenciales ordinarias. Para optimizar el diseño se realizó la simulación del modelo matemático en el programa Berkeley Madonna, logrando reducir el consumo energético de 7.09[kW] hasta 5.6[kW] mediante la incorporación de un aislante térmico. Finalmente Se realizó la construcción del secador de bandejas a escala bench.

**PALABRA CLAVE:** *Hoja de quinua, fortificante, proteína.*

**ABSTRACT:** Wheat flour, processed at the Escoma Municipality Cereal Plant, was fortified by adding 10% of dry quinoa leaf fortifier, managing to improve the protein

content of the flour from 6.8% to 8.5%. The most influential variables in the drying process were determined, being the temperature of 55[°C], the air speed of 2.21 [m/s] and the time of 2h and 33 min. The design of the equipment was carried out by scaling by geometric analogy, an air flow of  $12.48 \frac{m^3}{min}$  and a power of 7.09[kW] were calculated for the dryer at bench scale. A mathematical model established from mass and energy balances was proposed, which results in a set of 10 ordinary differential equations. To optimize the design, the simulation of the mathematical model was carried out in the Berkeley Madonna program, managing to reduce energy consumption from 7.09[kW] to 5.6[kW] by incorporating a thermal insulator. Finally, the construction of the bench-scale tray dryer was carried out.

**KEYWORDS:** *quinoa leaf, fortifying, protein*

## 1. INTRODUCCIÓN

La quinua ha sido desde épocas muy antiguas el principal alimento de las culturas andinas, pues este pseudocereal es uno de los alimentos más completo en cuanto a sus fuentes nutricionales, actualmente no se ha perdido estas costumbres, pues se ha notado Los impresionantes volúmenes de consumo en el mundo. La quinua en la región andina de Bolivia es aprovechada solo en la cosecha de los granos dejando de lado el valor nutricional de las hojas, esto debido a la falta de información sobre sus propiedades Nutricionales y/o la falta información sobre sus propiedades Nutricionales y sobre su tratamiento de

conservación. Este proyecto se enmarca en aprovechar el valor nutricional de las hojas de quinua (variedad blanca Junin) procedente del municipio de Escoma para obtener un fortificante natural pulverizado a partir de hojas de quinua seca para fortalecer las propiedades nutricionales de la PROCESADORA DE CEREALES de municipio de Escoma, de municipio de Escoma, mediante: el desarrollo, estudio, análisis, evaluación y construcción de un secador de bandejas a escala bench.

## 2. DESARROLLO

### 2.1. Caracterización de las Hojas de Quinua

La toma de muestra de las hojas se llevó a cabo en el municipio de Escoma. Se seleccionó una parcela representativa de la plantación de quinua, en el cual la planta se encontraba en la fase fenológica de panojamiento (máxima fluctuación de la proteína), Mediante la NB 13300-1 (propiedades físicas y organolépticas), y las normas NB 2048:2013, NE ISO 5983-2 (propiedad químico nutricional).

### 2.1.1. Caracterización de la Harina de Trigo

Para conocer los niveles nutricionales de la harina de trigo se realizó la caracterización mediante el análisis de laboratorio y pruebas experimentales. Los requerimientos y métodos de ensayo se lo realizaron según lo establecido en la Norma Boliviana NB-680.

### 2.2. Identificación de las Variables Influyentes

Para determinar las variables influyentes en el proceso de secado de hojas de quinua se tomó en cuenta el tipo de secador y las variables que regularmente afectan al proceso, se seleccionó el tipo de secador mediante el método de jerarquía analítica (AHP)

y mediante pruebas experimentales se identificó la influencia que tiene cada variable en el proceso frente a la variable respuesta.

**Tabla 2.1 Parámetros de secado a escala laboratorio (Temperatura variable)**

Temperatura de operación [°C]	Velocidad de aire [m/s]	Potencia del calentador [W]	Área de secado [m <sup>2</sup> ]
40		590	
50		650	
55	2.21	695	2·0.17·0
60		744	.19
70		820	

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 2.2 Parámetros de secado a escala laboratorio (Velocidad de aire variable)**

Velocidad del aire [m/s]	Temperatura de operación [°C]	Área de secado [m <sup>2</sup> ]	Masa inicial [g]	Espe sor de prod ucto [cm]
0.5				
1				
1.5	55	2·0.17·0	30	0.05
2		0.19		
2.5				

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 2.3. Parámetros de secado a escala laboratorio (Tamaño de partícula variable)**

Tamaño de partícula [cm]	Temperatura de operación [°C]	Velocidad del aire [m/s]	Área de secado [m <sup>2</sup> ]	Masa inicial [g]
0.25				

1				
2.25	55	2.21	2.0.17·	30
4			0.19	
16				

Fuente: Elaboración propia

### 2.2.1. Determinación de la Temperatura Óptima de Secado

Para la determinación de la temperatura se utilizó el secador tangencial de bandejas del IIDEPROQ.

**Tabla 2.4 Parámetros de secado a escala laboratorio (Temperatura variable)**

Temperatura de operación [°C]	Velocidad de aire [m/s]	Potencia del calentador [W]	Parámetros a analizar
40		590	Calcio
50		650	Fosforo
55	2.21	695	potasio
60		744	proteína
70		820	

Fuente: Elaboración propia

### 2.3. Diseño del Equipo y Definición de un Modelo Matemático

El diseño del secador de bandejas se lo realizó bajo el criterio de “Diseños de Equipos Normalizados” tomando en cuenta dos principales características de diseño, estas son: conocer las características y condiciones físicas del producto a secar y los elementos que componen al equipo:

- Espesor.
- Densidad.
- Cantidad de producto a secar.
- Dimensionamiento de las bandejas.
- Dimensionamiento de la separación entre bandejas.
- Dimensionamiento de la cámara de secado.
- Determinación del flujo de aire requerido.
- Determinación de la potencia requerida.

## 3. ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

### 3.1. Caracterización de las Hojas De Quinua y de la Harina de Trigo

#### 3.1.1. Características Químico Nutricional de las Hojas de Quinua.

**Tabla 3.1 análisis de ensayo de hojas de quinua**

Parámetro	Método	Unidades	Resultado
Calcio total	Microwave reaction system/EPA 215.1	mg/kg	17673
Fosforo total	Método calcinación/ASPT 91	mg/kg	7078
Potasio total	Microwave reaction	mg/kg	105757

Proteína en base seca	system/EPA 258.1	%	26
Proteína (fresca)	Norma Boliviana 20483-2013	%	4.6

Fuente: Laboratorio de Calidad Ambiental (LCA) e INLASA.

### 3.1.2. Características Químico Nutricionales de la Harina de Trigo.

En la Tabla 3.2 se muestra los resultados de harina de trigo que es procesada en la “Planta Procesadora de Cereales”.

**Tabla 3.2 Resultados De Análisis de Ensayo en Harina de Trigo**

Parámetro	Método	Unidades	Resultado
Calcio total	Microwave reaction system/EPA 215.1	mg/kg	424
Fosforo total	Método calcinación/ ASPT 91	mg/kg	1598
Potasio total	Microwave reaction system/EPA 258.1	mg/kg	4165
Proteína cruda	NFTA 3.1	%	6.8

Fuente: Informe Laboratorio de Calidad Ambiental (LCA)

Los resultados mostrados en la tabla 3.2 son determinantes ya que presenta valores muy bajos de contenido de

calcio, potasio y proteína en comparación con los requisitos establecidos en la Norma Boliviana NB 680 Norma de Harinas y derivados, en donde se especifica que:

- El nivel de proteína debe estar comprendido entre (8 – 18) (%)
- El contenido de calcio debe ser superior a 1000 mg/kg.
- El contenido de potasio debe ser superior a 4000 mg/kg.

### 3.2. Resultados de las Variables más Influyentes en el Proceso de Secado.

#### a) Influencia de la temperatura

Para la temperatura se experimenta con temperaturas desde los 40 [°C] hasta los 60[°C], para lo cual el tamaño de partícula se mantiene constante al igual que el tiempo de secado será 75 minutos los valores obtenidos se muestran en la tabla 3.3.

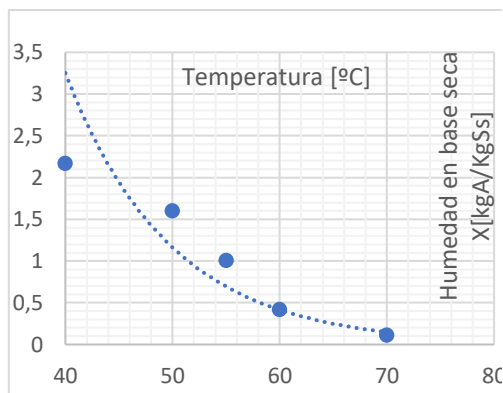
**Tabla 3.3 Datos experimentales de la humedad en función de la temperatura**

Temperatura [°C]	X[kgA/kgSs] t=75[min]
40	2.173
50	1.6
55	1.01
60	0.42

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 3.1 Variación de la humedad X en función de la temperatura T**



Fuente: Elaboración propia

La temperatura de secado influye en la humedad de las hojas de quinua, a mayor temperatura la humedad de las hojas de quinua es menor, sin embargo, cuando se trabaja con temperaturas superiores a los 60 [°C] la humedad no varía significativamente.

**b) Influencia del tiempo.**

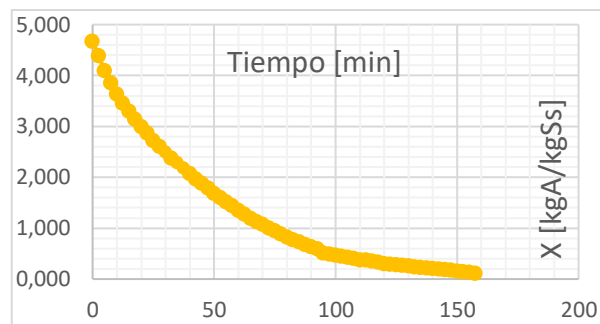
Desde un tiempo inicial de 0 [min] hasta los 158 [min], donde el tamaño de partícula se mantiene constante al igual que la temperatura de secado el cual es de 55 [°C] los valores obtenidos se muestran en la tabla 3.4.

**Tabla 3.4 Datos experimentales de la humedad en función del tiempo**

Tiempo [min]	X[kgA/kgSs]
	T=55[°C]
0	4.50
40	2.00
80	0.85
158	0.13

Fuente: Elaboración propia, 2022

**Figura 3.2 Variación de la humedad X en función del tiempo t**



Fuente: Elaboración propia

En la figura 3.2 el tiempo de secado si es una variable influyente en la humedad de las hojas de quinua, a mayor tiempo de secado la humedad de las hojas de quinua es menor, además se puede observar que para tiempo superior de los 158 minutos, la humedad final de las hojas de quinua estaría por debajo de la humedad final de la harina de trigo.

**c) Influencia de la velocidad de aire**

Para la velocidad de aire de secado se experimenta con velocidades: (0.5, 1, 1.5, 2, 2.5) para lo cual el tamaño de partícula se mantiene constante al igual que la temperatura de secado el cual es de 55 [°C], los valores obtenidos se muestran en la tabla 3.5.

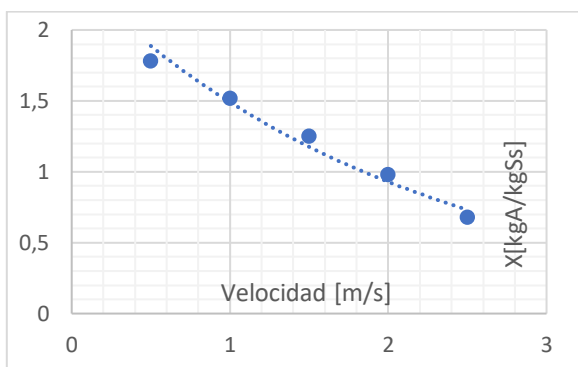
**Tabla 3.5 Datos experimentales de la humedad en función de la velocidad del aire**

Velocidad[m/s]	X[kgA/kgSs]
	t=50[min]
0.5	1.78

1	1.52
1.5	1.25
2	0.98
2.5	0.68

Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.3 Variación de la humedad en función de la velocidad del aire**



Fuente: Elaboración propia

En la figura 3.3 se observa que la velocidad del aire influye en la humedad de las hojas de quinua, a mayor velocidad del aire la humedad es menor, esta curva también muestra que para velocidades superiores de 2.5  $\left[\frac{m}{s}\right]$  la humedad no varía significativamente, además causaría la caída de las hojas por el impulso del viento.

**d) Influencia de tamaño de partícula**

Para el tamaño de partícula se experimenta con diferentes cortes de la materia prima, definiendo tamaños definidos de: (0.25, 1, 2.50, 4, tamaño natural promedio)  $[m^2]$  para lo cual el tiempo de secado se mantiene

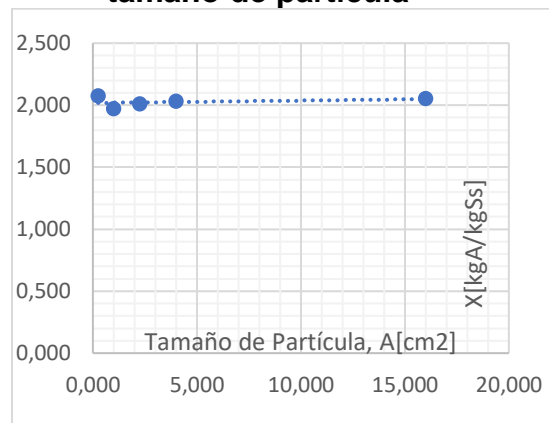
constante a 40 minutos, al igual que la temperatura de secado que es 55  $^{\circ}C$  y la velocidad de aire también se mantiene constante, los valores obtenidos se muestran en la tabla 3.6.

**Tabla 3.6 Datos experimentales de la humedad en función del tamaño de partícula**

Tamaño de partícula A[cm2]	X[kgA/kg Ss] t=40[min]
0.250	2.073
1.000	1.971
2.250	2.011
4.000	2.031
(Tamaño promedio) 16.000	2.051

Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.4 Variación de la humedad en función del tamaño de partícula**



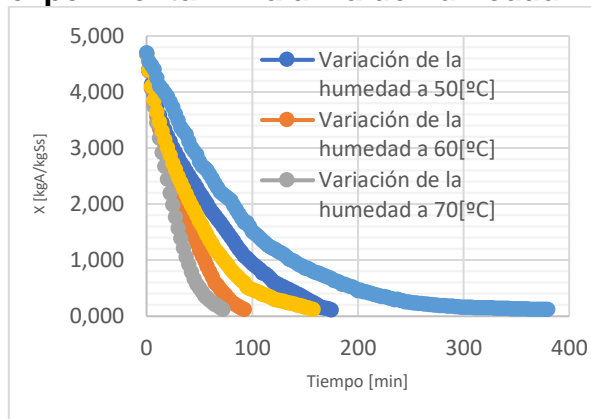
Fuente: Elaboración propia

En la figura 3.4 el tamaño de partícula no influye apreciablemente en la variable respuesta o humedad de las hojas de quinua. Por lo tanto, se considera que el tamaño de producto será igual al tamaño natural,

característico propio de las hojas de quinua.

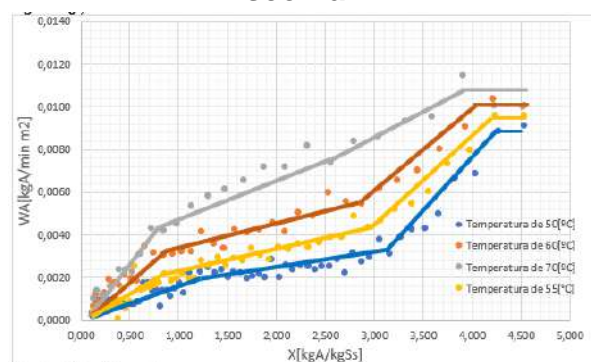
### 3.2.1. Temperatura Óptima de Operación y Resultado de Análisis de Laboratorio

**Figura 3.5 curva de secado experimental – Balanza de humedad**



Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.6 Velocidad de secado en condiciones atmosféricas de Escoma**



Fuente: Elaboración propia

En la figura 3.6 se puede observar que a mayor temperatura menor es el tiempo de secado, sin embargo, este dato no es suficiente para determinar la temperatura óptima, porque esto no garantiza que las propiedades nutricionales se conserven, por lo

tanto, se requiere de un análisis químico nutricional a los productos secos de esta experiencia. Los parámetros a analizar son: calcio, fósforo, potasio y proteína. Los resultados presentados por el Laboratorio (LCA), se describen en la tabla 3.7, 3.8, 3.9, 3.10

**Tabla 3.7 Resultados de laboratorio de análisis de hojas de quinua secas a 50°C**

Parámetro	Unidad	Límite de determinación	Hojas de quinua seca
Calcio total	mg/kg	8.0	20450
Fosforo total	mg/kg	0.40	6025
Potasio Total	mg/kg	8.0	9760
Proteína cruda	%	0.0630	26

Fuente: Elaboración propia en base al informe de resultados LCA

En la tabla 3.8 se muestra el contenido de calcio total, fósforo total, potasio total y proteína cruda de las hojas de quinuas secadas a 55°C, no existe un cambio significativo con los resultados de la tabla 3.7 el cual es secado a 50°C.

**Tabla 3.8 Resultados de laboratorio de análisis de hojas de quinua secas a 55°C**

Parámetro	Unidad	Límite de determinación	Hojas de quinua seca
Calcio total	mg/kg	8.0	20290
Fosforo total	mg/kg	0.40	5575
Potasio Total	mg/kg	8.0	97024
Proteína cruda	%	0.0630	26

Fuente: Elaboración propia en base al informe de resultados LCA

**Tabla 3.9 Resultados de laboratorio de análisis de hojas de quinua secas a 60°C**

Parámetro	Unidad	Límite de determinación	Hojas de quinua seca
Calcio total	mg/kg	8.0	19560
Fosforo total	mg/kg	0.40	5820
Potasio Total	mg/kg	8.0	90500
Proteína cruda	%	0.0630	25

Fuente: Elaboración propia en base al informe de resultados LCA

**Tabla 3.10 Resultados de laboratorio de análisis de hojas de quinua secas a 70°C**

Parámetro	Unidad	Límite de determinación	Hojas de quinua seca
Calcio total	mg/kg	8.0	20290
Fosforo total	mg/kg	0.40	5575

Potasio Total	mg/kg	8.0	95054
Proteína cruda	%	0.0630	22.5

Fuente: Elaboración propia en base al informe de resultados LCA

En base a los resultados de laboratorio se elaboró la tabla 3.11, en donde se muestra la temperatura de secado, porcentaje de proteína cruda y tiempo de secado.

**Tabla 3.11 Resumen de Resultados de Laboratorio**

Temperatura de secado [°C]	Proteína cruda %	Tiempo de secado [min]
50	26	175
55	26	158
60	25	93
70	22.5	73

Fuente: Elaboración propia  
Analizando los resultados obtenidos, se concluye que la temperatura de secado óptima para que las propiedades nutricionales no se desnaturalicen está comprendida entre 50 y 55 °C.

### 3.3. Diseño del Secador de Bandejas y Definición del Modelo Matemático

#### 3.3.1. Dimensionamiento de los Elementos del Secador de Bandejas

Principalmente se consideró el principio de la similitud geométrica en las dimensiones de la bandeja a escala laboratorio  $L_L, W_L$  con respecto



a las dimensiones de la bandeja a escala bench  $L, W$

$$\frac{L}{L_L} = \frac{W}{W_L} = q \quad (3.2)$$

**Tabla 3.12 Datos del secador de bandejas a escala laboratorio**

Magnitud	Unidad	Valor
Largo de la bandeja a escala laboratorio $L_L$	[m]	0.17
Ancho de la bandeja a escala laboratorio $W_L$	[m]	0.19
Velocidad del aire a escala laboratorio $\dot{v}_L$	$\left[\frac{m}{s}\right]$	2.21
Temperatura de operación del secador de bandejas a escala laboratorio $T_L$	[°C]	55

Fuente: Elaboración propia

Para el diseño a escala bench se consideró una relación de escalamiento lineal  $q = 2.76$ , posteriormente mediante la ecuación (3.2) se calculó las dimensiones de la bandeja a escala bench  $L, W$ :

$$\frac{L}{L_L} = q \rightarrow L = q \cdot L_L$$

$$L = 2.76 \cdot 0.17[m] = 0.47[m]$$

$$\frac{W}{W_L} = q \rightarrow W = q \cdot W_L$$

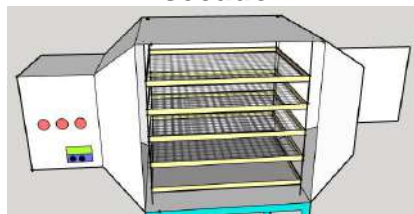
$$W = 2.76 \cdot 0.19[m] = 0.52[m]$$

La separación entre bandejas, es otro parámetro crítico, siendo entre 7[cm] y 10[cm] lo típico

### 3.3.2. Resultado de las Dimensiones de la Cámara de Secado

La cámara de secado se dimensionó tomando en cuenta todas las consideraciones necesarias, es decir, que tiene la forma de un paralelepípedo con dos pirámides truncadas en la entrada y salida del aire, en las cuales se colocaran 4 bandejas separadas 10[cm] entre sí, y en cada una se secan 250[g] de hojas de quinua frescas (figura 3.7). Al ser un equipo que opera a presión atmosférica no presenta restricciones con respecto al espesor del material de las paredes de la cámara por lo que se toma como referencia

**Figura 3.7 Diseño de la cámara de secado**



Fuente: Elaboración Propia

En la tabla 3.13 se muestra el resumen del dimensionamiento de la cámara de secado como resultado de varias consideraciones de diseño

**Tabla 3.13 Dimensiones de la cámara de secado**

Dimensiones de la cámara	Variable de diseño	Tamaño y unidad
Longitud de la bandeja	$L$	47[cm]
Ancho de la bandeja	$W$	52[cm]
Espacio libre entre bandejas (vivo)	$s$	8[cm]
Alto interno del secador	$H_c$	55[cm]
Longitud interna del secador	$L_c$	60[cm]
Ancho interno del secador	$W_c$	57[cm]
Altura de la puerta	$H_p$	50[cm]
Longitud de la puerta	$L_p$	50[cm]
Longitud del conducto cuadrangular en la entrada	$L_a$	25[cm]
Longitud de la pirámide truncada en la entrada	$L_b$	15[cm]
Longitud de la pirámide truncada en la salida	$L_d$	20[cm]
Altura del área transversal de la entrada y salida de aire	$h$	35[cm]
Ancho del área transversal de la entrada y salida de aire	$w$	35[cm]
Espesor del acero inoxidable AISI 304, acabado 2B	$e_{AI}$	1[mm]
Distancia entre la base inferior de la cámara de secado y la bandeja de acero inoxidable	$p$	5[cm]

Fuente: Elaboración propia

### 3.4. Determinación del Flujo de Aire

Escalamiento considerando la conservación del Momentum, que consiste en la igualación del número de Reynolds a escala laboratorio con el número de Reynolds a escala bench:

$$Re_L = \frac{\rho \cdot \dot{v}_L \cdot L_L}{\mu} = \frac{\rho \cdot \dot{v}_B \cdot L}{\mu} \quad (3.3)$$

Determinación de la velocidad del aire a escala bench  $\dot{v}_B$ :

$$\begin{aligned} \frac{\rho \cdot \dot{v}_L \cdot L_L}{\mu} &= \frac{\rho \cdot \dot{v}_B \cdot L}{\mu} \\ \dot{v}_B &= \frac{\dot{v}_L \cdot L_L}{L} = \frac{2.21 \left[ \frac{m}{s} \right] \cdot 0.17[m]}{0.47[m]} \\ &= 0.8 \left[ \frac{m}{s} \right] \end{aligned}$$

Cálculo del flujo volumétrico de aire mediante la ecuación (3.4)

$$\dot{V}_a = Z \cdot W \cdot (N_b + 1) \cdot \dot{v}_a \quad (3.4)$$

Al ser una cámara para secado de hojas de quinua, se escaló anteriormente obteniéndose una velocidad de aire de secado en la cámara de  $0.8 \left[ \frac{m}{s} \right]$ , y la misma se encuentra en un rango aceptable de bajas y medias velocidades de secado, haciendo uso de la ecuación (5.4) se tiene el siguiente cálculo:

$$\begin{aligned} \dot{V}_a &= 0.10[m] \cdot 0.52[m] \cdot (4 + 1) \\ &\quad \cdot 0.8 \left[ \frac{m}{s} \right] \\ &= 0.208 \left[ \frac{m^3}{s} \right] = 12.48 \left[ \frac{m^3}{min} \right] \end{aligned}$$

Mediante la ecuación de continuidad la velocidad necesaria de un ventilador de dimensiones definidas:

$$\rho_v \cdot \dot{v}_v \cdot A_v = \rho_{cs} \cdot \dot{v}_a \cdot A_{cs} \quad (3.5)$$

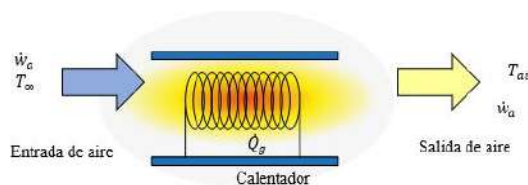
Despejando la ( $\dot{v}_v$ ) Velocidad del aire por efecto del ventilador se tiene:

$$\begin{aligned} \dot{v}_v &= \frac{\dot{v}_a \cdot A_{cs}}{A_v} = \frac{0.8 \left[ \frac{m}{s} \right] \cdot 0.26 [m^2]}{0.1225 [m^2]} \\ &= 1.7 \left[ \frac{m}{s} \right] \end{aligned}$$

### 3.5. Determinación de la Potencia Requerida

El secado por convección tiene como principio exponer el producto a una atmosfera de secado de temperatura y humedad constantes, por lo que para calcular la potencia necesaria del calentador se llevara el aire ambiente a las condiciones de operación del secador  $T_{ai} = 55 [^{\circ}C]$ . Mediante balance energético.

**Figura 3.8 Esquema del balance energético en el calentador**



Fuente: Elaboración propia

$$\begin{aligned} \dot{w}_a \left[ \frac{kgB}{s} \right] \cdot \dot{H}_{\infty} \left[ \frac{kcal}{kgB} \right] + \dot{Q}_g \left[ \frac{kcal}{s} \right] \\ - \dot{w}_a \left[ \frac{kgB}{s} \right] \cdot \dot{H}_{ai} \left[ \frac{kcal}{kgB} \right] \\ = 0 \quad (3.6) \end{aligned}$$

$$\dot{Q}_g = \dot{w}_a (\dot{H}_{ai} - \dot{H}_{\infty}) \quad (3.7)$$

Flujo de aire:

$$\dot{w}_a = \rho_a \cdot \dot{V}_a \quad (3.8)$$

Temperatura promedio:

$$T_a = \frac{T_{\infty} + T_{ai}}{2} \quad (3.9)$$

$$T_a = \frac{18.5 [^{\circ}C] + 55 [^{\circ}C]}{2} = 37 [^{\circ}C]$$

Densidad del aire a temperatura promedio:

$$\begin{aligned} \rho_a &= \frac{475 [mmHg] \cdot 29 \left[ \frac{g}{mol} \right]}{62.4 \left[ \frac{mmHg \cdot L}{K \cdot mol} \right] \cdot (37 + 273) [K]} \\ \rightarrow \rho_a &= 0.712 \left[ \frac{kg}{m^3} \right] \end{aligned}$$

Reemplazando datos en la ecuación (3.8) se tiene:

$$\begin{aligned} \dot{w}_a &= \rho_a \cdot \dot{V}_a \rightarrow \\ \dot{w}_a &= 0.712 \left[ \frac{kg}{m^3} \right] \cdot 0.208 \left[ \frac{m^3}{s} \right] = 0.148 \left[ \frac{kg}{s} \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{H}_{ai} &= (C_{pB} + C_{pAV} Y_{ai}) (T_{ai} - T_0) \\ &\quad + \lambda_0 Y_{ai} \quad (3.9) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{H}_{\infty} &= (C_{pB} + C_{pAV} Y_{\infty}) (T_{\infty} - T_0) \\ &\quad + \lambda_0 Y_{\infty} \quad (3.10) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Y_{ai} &= \left( \frac{\varphi_{ai} \cdot p_{ai}}{p_a - \varphi_{ai} \cdot p_{ai}} \right) \frac{PM_A}{PM_B} \quad (3.11) \end{aligned}$$

$$Y_{\infty} = \left( \frac{\varphi_{\infty} \cdot p_{\infty}}{p_a - \varphi_{ai} \cdot p_{\infty}} \right) \frac{PM_A}{PM_B} \quad (3.12)$$

$$p_{ai} = 10^{AC - \frac{BC}{T_{ai} + CC}} \quad (3.13)$$

$$p_{\infty} = 10^{AC - \frac{BC}{T_{\infty} + CC}} \quad (3.14)$$

Reemplazando datos en la ecuación (5.8) se tiene:

$$\dot{Q}_g = \dot{w}_a (\underline{H}_{ai} - \underline{H}_{\infty}) \rightarrow$$

$$\dot{Q}_g = 0.148 \left[ \frac{kgB}{s} \right] (18.05 - 6.5933) \left[ \frac{kcal}{kgB} \right]$$

$$\begin{aligned} \dot{Q}_g &= 1.696 \left[ \frac{kcal}{s} \right] \cdot \frac{1000[cal]}{1[kcal]} \cdot \frac{4.184[J]}{1[cal]} \\ &= 7094.54[W] \end{aligned}$$

### 3.6. Resultados del Modelo Matemático

**Tabla 3.14 Ecuaciones diferenciales que representan el modelo matemático**

Resumen de ecuaciones diferenciales que representan el modelo matemático del balance de masa y energía

$$\frac{dX_1}{dt} = -k_1(X_1 - X_{eq})$$

$$\frac{dX_2}{dt} = -k_2(X_2 - X_{eq})$$

$$\frac{dX_3}{dt} = -k_3(X_3 - X_{eq})$$

$$\frac{dX_4}{dt} = -k_4(X_4 - X_{eq})$$

$$\frac{dY}{dt} = \frac{\dot{w}_B}{M_B} \cdot (Y_e - Y)$$

$$+ \left( \frac{k_1 M_{s1}(X_1 - X_{eq}) + k_2 M_{s2}(X_2 - X_{eq}) + k_3 M_{s3}(X_3 - X_{eq}) + k_4 M_{s4}(X_4 - X_{eq})}{M_B} \right)$$

$$\begin{aligned} \frac{dT_{s1}}{dt} &= \frac{h_{cs1}A(T_{ai} - T_{s1}) + (C_{pAL}T_{s1} - \Delta h_{v1})k_1 M_{s1}(X_1 - X_{eq})}{M_{s1}(C_{ps} + C_{pAL}X_1)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{dT_{s2}}{dt} &= \frac{h_{cs2}A(T_{ai} - T_{s2}) + (C_{pAL}T_{s2} - \Delta h_{v2})k_2}{M_{s2}(C_{ps} + C_{pAL}X_2)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{dT_{s3}}{dt} &= \frac{h_{cs3}A(T_{ai} - T_{s3}) + (C_{pAL}T_{s3} - \Delta h_{v3})k_3}{M_{s3}(C_{ps} + C_{pAL}X_3)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{dT_{s4}}{dt} &= \frac{h_{cs4}A(T_{ai} - T_{s4}) + (C_{pAL}T_{s4} - \Delta h_{v4})k_4}{M_{s4}(C_{ps} + C_{pAL}X_4)} \end{aligned}$$

$$\frac{dT_{ai}}{dt} =$$

$$\frac{\dot{Q}_g + \dot{Q}_{entrada} - \dot{Q}_{salida} - (C_{pAV}T_{ai} + \lambda_0)}{M_B}$$

Fuente: Elaboración propia

### 3.7. Resultados de la Composición Nutricional de la Harina Fortificada

Los resultados de la caracterización de parámetros de calidad se muestran en Tabla 3.15, para harina de trigo fortificada al 10%.



**Tabla 3.15 Características de la harina de trigo fortificado**

Características de la harina de trigo fortificada	
Tipo de harina	Harina de trigo fortifica con hojas de quinua
Cantidad de fortificante a dosificar	10 g de fortificante /100 g de harina de trigo
% de gluten húmedo	34.43 %
% de humedad	13.4
% proteína cruda	8.545

Fuente: Elaboración propia

Tomando en cuenta la legislación reglamentaria de harinas de trigo y la norma Bolivia NB 680, se determinó que la cantidad máxima de hojas de quinua seca a dosificar es del 10%. Para esta cantidad de fortificante, las características de calidad y nutrición de la harina fortificada se encuentran dentro de lo establecido en la NB 680.

### 3.8. Discusión de resultados.

Los resultados hallados en esta investigación son significativos, ya que muestra que la utilización de hoja de quinua como fortificante mejoraría la composición nutricional de productos a base de quinua. El valor nutricional de las hojas de quinua encontrado en este estudio es consistente en estudios previos que han documentado la alta densidad de nutrientes de la quinua.

Sin embargo, pocos estudios han comparado directamente la quinua con la haría de trigo en términos de potencial de fortificación, este estudio proporciona datos específicos y cuantitativos que son de gran ayuda a futuras investigaciones. La fortaleza de este estudio es la metodología exhaustiva utilizada para determinar el contenido nutricional y condiciones óptimas de secado de las hojas de quinua.

## 4. DISCUSIÓN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

### 4.1. Discusión.

El diseño del secador se realizó con el fin de fortificar la harina de trigo, se realizó un análisis de laboratorio para determinar el contenido nutricional de las hojas de Quinua, las cuales mostraron un alto contenido de proteína cruda (26%), calcio total (17673 mg/kg), potasio total (105757 mg/kg) y fósforo total (7078 mg/kg). Comparados con la harina de trigo, estos valores son significativamente superiores. La harina de trigo presenta proteína total (6,8%), calcio total (424 mg/kg), potasio total (4265 mg/kg) y fósforo total (1598 mg/kg), por lo tanto,

se considera a las hojas de quinua como un excelente fortificante natural capaz de mejorar los niveles de proteína, calcio, potasio y fósforo de la harina de trigo. El desarrollo del proceso de secado y el diseño del equipo son fundamentales para asegurar la calidad del fortificante. Las pruebas confirman que la adición de 10% de hojas de quinua a la harina de trigo es efectiva y cumple con las normas de calidad.

#### 4.2. Conclusiones

- Se logró identificar las variables de mayor influencia en el proceso de secado de las hojas de quinua, de las cuales se identificó a: la temperatura, tiempo, velocidad de aire de secado como las variables más influyentes en el proceso de secado, además se ha demostrado que el tamaño de partícula no altera significativamente en el proceso.
- Se realizó el diseño del equipo mediante el principio de similitud geométrica usando el programa Sketchup 3D y se planteó el desarrollo de un modelo matemático que describe el comportamiento del proceso de

secado mediante balances máxicos y energéticos en estado transitorio, este modelo resulta en un sistema de diez ecuaciones diferenciales ordinarias.

- Se realizó la simulación del modelo matemático en el programa Berkeley Madonna V8.3.18, se usó este programa debido a que, consta de varios métodos numéricos integrados, y también por su versatilidad y rapidez para trabajar con ecuaciones diferenciales acoplados. Además, se optimizó el modelo matemático mediante la incorporación de un aislante térmico el cual permite la reducción de la potencia consumida desde  $101.76 \left[ \frac{kcal}{min} \right]$  hasta  $80.3 \left[ \frac{kcal}{min} \right]$  siendo el espesor óptimo de  $2 [cm]$  y el aislante poliestireno expandido.
- En base al diseño se logró construir un secador de bandejas a escala bench, cuyo material es acero inoxidable del tipo AISI 304 acabado 2B de un milímetro de espesor acabado 2B de un milímetro de espesor (Número de malla 8), un ventilador de  $12.5 \left[ \frac{m^3}{min} \right]$  de flujo de aire, tres calentadores

de conexión individual. También se construyó la mesa soporte de 1.20 [m] de altura, en el cual se sostiene la cámara de secado.

- Se realizaron pruebas de gluten y humedad en laboratorio del producto final, el cual resultó un contenido de gluten húmedo igual a 34.43% y la humedad final de este producto fue de 13.4%, los resultados obtenidos están dentro del límite establecido por la Norma Boliviana NB-680 de harinas y derivados de harinas de trigo. También se determinó el porcentaje de proteína, el cual mejoró desde 6.8 % hasta 8.54 %, este resultado está dentro del rango establecidos por la Norma Boliviana NB-680.

#### 4.2. Recomendaciones

- Se recomienda emplear el fortificante en otros alimentos o como consumo directo.
- Se recomienda tomar en cuenta el modelo matemático como punto de partida para la adaptación de secado de hojas de quinua y otros vegetales en condiciones atmosféricas distintas a la del municipio de Escoma.

- Los distintos niveles de gobierno, industrias públicas y privadas, organizaciones y fundaciones no-gubernamentales, y la universidad, deben realizar acuerdos que fomenten la realización de más investigación dentro del campo de aprovechamiento agroindustrial, con los cuales se obtengan resultados que permitan ejecutar proyectos en beneficio de la sociedad y el medio ambiente
- Se recomienda realizar un estudio económico detallado para establecer los costos de operación y precio de venta del fortificante natural.

#### 5. REFERENCIAS.

- Aversa M., C. (2005). An analysis of the transport phenomena occurring during food drying process.
- Bellestros, M. (2014). Uso del programa Berkeley Madonna para el desarrollo de modelos en Ingeniería química.
- Bojanic, A. (2011). La Quinua: Cultivo milenario para contribuir a la seguridad alimentaria mundial. América Latina y el Caribe.
- Capparelli, L. (2011). Traditional post-harve processing to make quinoa grains (chenopodium quinoa var. quinoa) apt for consumption in Northern Lipez (Potosí, Bolivia): ethnoarchaeological

- and archaeobotanical analyses. *Archaeol. Anthropol Sci*, 49-70.
- Cengel, Y. A. (1997). *Transferencia de Calor y Masa (un enfoque práctico)*. Mc Graw.
- Collazo, A. (2023). *Modelos Matemáticos y Experimentales para Análisis del Secador de semillas*. Ciencias técnicas agropecuarias.
- Collazo-Abreu, P., Morejón-Mesa, et al., (2018). Modelos matemáticos y experimentales para el análisis del secado solar de semillas. *Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 27(1), 89-98. Recuperado el 13 de enero de 2023, de [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2071-00542018000100009](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2071-00542018000100009)
- Diovisalvi, N. V. (2021). *Fertilidad de Suelos y Nutrición Vegetal*.
- FAO. (2014). *Guía para la exhibición de quinua Andina*.
- FAO, O. d. (2013). *Catálogo de Variedades Comerciales de la Quinua*.
- Gobernación, & Gobierno Autónomo Municipal de Escoma. (2012 - 2016). *Plan Territorial de Desarrollo Integral Informativo*.
- Mariño Salguero, J., & Chico Andrade, L. (2012). *Diseño, construcción e instalación de una cámara experimental para deshidratación de productos agrícolas*. Tesis, Riobamba. Recuperado el 29 de julio de 2022, de <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/2340/1/15T00507.pdf>
- Maughan P. Jellen, A. (2004). A genetic Linkage Map of Quinoa (*Chenopodium quinoa*) based on AFLP, RAPD, and SSR markers. In Stevens, Coleman, 1188-1195.
- Ninaraqui, R. (2015). *Efecto del escaldado y temperatura en la cinética de secado de hojas de quinua variedad salceso inia*. Puno - Perú.
- Pérez, L., & Estrada, H. (1998). *Deshidratación Osmótica de alimentos*.
- Perry, R. (1997). *Manual del Ingeniero Químico (séptima edición ed.)*. McGraw-Hill. Recuperado el 21 de diciembre de 2022
- Treybal, R. E. (1997). *Operaciones de transferencia de masa*.
- Villacres, E., Edmundo, L., et al., (2014). *La riqueza oculta de las hojas de quinua (Chenopodium quinoa will)*. Quito Ecuador.



*Bodas de Marmol*

**85**

*Años Formando  
Profesionales Exitosos*

**Todos los Derechos Reservados  
Carrera de Ingeniería Industrial  
Facultad de Ingeniería  
Universidad Mayor de San Andrés**

**La Paz - Bolivia 2024**