

# “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA AUTOMATIZADO DE TRATAMIENTO TÉRMICO PARA LA MODIFICACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DEL ARROZ PILADO EN LA EMPRESA AGRORIVERAVILLAFUERTE S.A.”

Héctor Terán, Juan Correa, Edgar Rivera.  
Ingeniería Mecatrónica. Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE,  
Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica  
Quijano y Ordóñez S/N y Hermanas Páez, Latacunga, Ecuador,  
e-mail: [heteran@espe.edu.ec](mailto:heteran@espe.edu.ec), [jcorrejacome@yahoo.es](mailto:jcorrejacome@yahoo.es), [rivesantyed@icloud.com](mailto:rivesantyed@icloud.com).

## RESUMEN

El presente artículo expone el diseño e implementación de un sistema automatizado de tratamiento térmico para modificar las propiedades físico-químicas del arroz pilado buscando la mejora del mismo en el instante de su cocción. Para su implementación se utiliza dos métodos fundamentales de diseño: por calidad y conceptual mediante matriz morfológica buscando así una optimización y funcionalidad del diseño. La máquina consta de tres subsistemas fundamentales para su funcionamiento: el sistema de carga, sistema de tratamiento térmico y sistema de descarga; además de un sistema electrónico dimensionado funcionalmente para asegurar una óptima operación de los elementos mecánicos.

El sistema se encuentra automatizado en su totalidad gracias al uso de un PLC y por medio de un HMI desarrollado e implementado en una Touch Panel es posible monitorear y supervisar el estado del proceso. Un control de acceso por usuarios se encuentra implementado con dos niveles de prioridad con la cualidad de crear, modificar y eliminar recetas dependiendo del usuario seleccionado; el HMI consta de ventanas que permiten un control manual o automático del proceso de tratamiento térmico y un ventana que muestra la gráfica de la variación de la temperatura con respecto al tiempo.

## Palabras Claves:

Sistema automatizado, tratamiento térmico, propiedades físico-químicas, arroz pilado.

## ABSTRACT

This paper presents the design and implementation of an automated heat treatment system to modify the physicochemical properties of milled rice seeking improving it at the time of cooking. To implement two fundamental design methods is used: for quality and conceptual by morphological matrix and looking for an optimization and design functionality. The machine consists of three main subsystems for operation: charging system, thermal processing system and discharge system; and an electronic system functionally dimensioned to ensure optimum operation of the mechanical elements.

The system is fully automated by the use of a PLC and HMI via a developed and implemented in a Touch Panel is possible to monitor and monitor the process state. A user access control is implemented with two levels of priority to the quality of creating, modifying and deleting recipes depending on the selected user; HMI comprises windows which allow a manual or automatic control of the heat treatment, and a window that displays the graph of the variation of temperature with time.

## Keywords:

Automated, heat treatment, physical-chemical properties, milled rice.

## I. INTRODUCCIÓN

El arroz al ser el segundo cereal más consumido en el mundo después del trigo requiere un cuidadoso estudio y análisis, por tal razón este es el pilar

fundamental en el presente proyecto; el cual busca investigar y estudiar las propiedades físicas y químicas del arroz y mediante el diseño de una cámara de tratamiento térmico mejorar dichas características sin alterar sus propiedades organolépticas.

A pesar de existir grandes limitantes y condicionamientos para el desarrollo del proyecto como la variedad del arroz a tratar, el tiempo de procesamiento, el tiempo de reposo, las características finales esperadas, etc., se procederá a realizar un análisis únicamente de las características indispensables del arroz necesarias en este proyecto; de igual manera en el ámbito mecánico y eléctrico de los componentes de los cuales consta la máquina.

Para tener una visión más clara de la descripción del sistema diseñado cabe recalcar que este se basa en la elaboración de una doble cámara de tratamiento térmico, en la parte más interna contendrá el arroz pilado y listo a ser tratado térmicamente, este estará aislado de la carcasa exterior para evitar que el operador sufra quemaduras y pueda manipular la maquinaria respetando así normas de seguridad y de ergonomía; se desarrollará un sistema automatizado para el control de temperatura.

**II. ANÁLISIS AGRÓNOMO**

**AMILOSA Y AMILOPECTICA**

La biosíntesis del almidón es un proceso que involucra la formación de dos moléculas: amilosa y amilopectina. La relación entre estas dos determina algunas propiedades importantes del arroz durante y después de la cocción. La amilosa y amilopectina son dos moléculas que constan en el almidón (carbohidratos complejos). Ambas se componen de cadenas largas de moléculas de glucosa; cerca del 20% de la mayoría de los almidones es amilosa y el 80% amilopectina.

El contenido de amilosa es considerado el factor más importante a la hora de predecir las características del arroz cocido y su comportamiento durante procesamiento. El contenido de amilosa está directamente relacionado con la absorción de agua, la expansión de volumen, esponjosidad y la separación de los granos cocinados y se encuentra inversamente relacionado con la cohesión y la aglutinación; la amilosa actúa como un diluyente y un inhibidor de la inflamación, especialmente en la presencia de lípidos.

El contenido de amilosa influye en la temperatura de gelatinización, es inversamente proporcional, ya que a mayor contenido de amilosa, menor temperatura de gelatinización y viceversa. Por lo general, se

desea arroces que tengan un contenido intermedio de amilosa ya que proporciona mejores características en productos derivados de este.

**III. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN**

**DISEÑO POR CALIDAD**

La casa de la calidad Figura 1.1 es una herramienta del QFD (Despliegue de la Función de Calidad) que permite satisfacer los requisitos del cliente en todo el proceso de diseño.

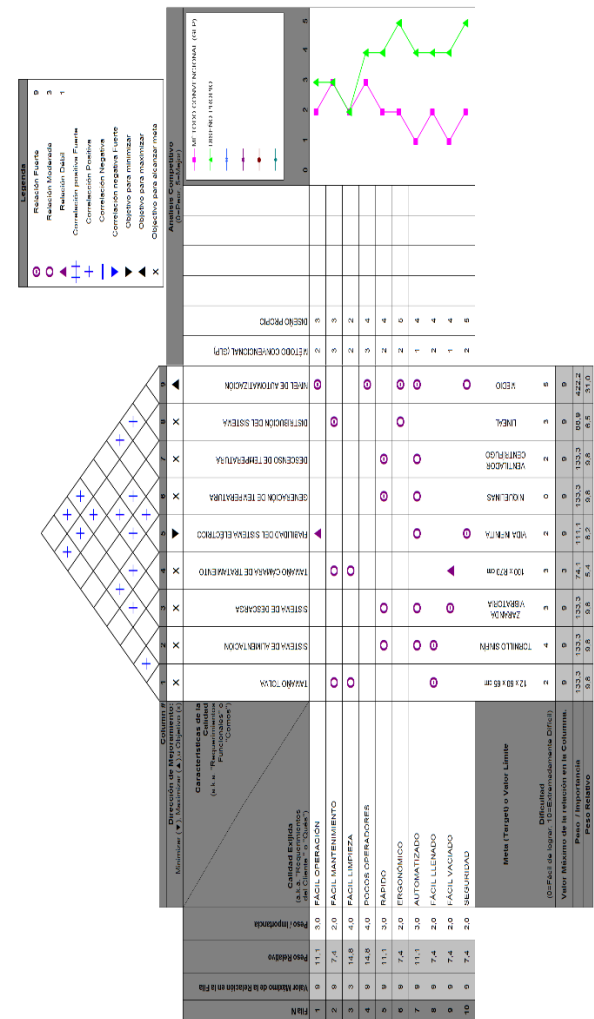


Figura 1.1. Casa de la calidad

**DISEÑO CONCEPTUAL**

Es una técnica del diseño en la cual se presenta diversas alternativas de solución a los problemas o componentes del sistema a diseñar y mediante ponderaciones basadas en distintos criterios se selecciona la de mejores prestaciones para su implementación.

En la Figura 1.2 se muestra el desarrollo del diseño conceptual mediante matriz morfológica.

Parte:	Selección	Ventaja	Desventaja
Tolva de almacenamiento para flujo másico	Piramidal con base cuadrada	Alta capacidad de almacenaje, control de flujo de salida, vaciado según principio first in – last out.	Costo de fabricación, tamaño físico.
Transportador Mecánico de Carga a la Cámara	Tornillo Sinfin	Compacto, fácil instalación, soporta altas temperaturas, versátil, varias zonas de carga y descarga.	No grandes distancias no transporta materiales frágiles.
Cámara de tratamiento forma geométrica	Cilíndrica	Fácil de construir, media efectividad en transferencia de calor, costo reducido.	Menor capacidad de volumen.
Distribución tubería dentro de la cámara de tratamiento	Ángulo de arreglo 30°	Permite mayor densidad de tubos, tienen una mayor relación de transferencia de calor.	No permite limpieza del sistema.
Sistema de calentamiento	Niquelinas	Bajo costo, libre de mantenimiento, usa como medio energía eléctrica, fácil de instalar.	Tarda en alcanzar su potencia nominal.
Sistema de enfriamiento	Ventilador centrífugo	Controlable, eficaz, durabilidad, facilidad de instalación.	Complejidad de diseño, costo medio.
Sistema o algoritmo de control inteligente	PID	Altamente recomendable en procesos de control de variables, diversos parámetros para modificar.	Difícil sintonización, requiere de conocimientos técnicos.
Controlador	PLC	Ideal para ambientes industriales, bajo costo, flexibilidad, facilidad de programación.	Memoria reducida, centraliza el proceso, mano de obra especializada.
Medio de interacción entre humano y máquina	TouchPanel	Versátil, fácil de programar, amigable con el usuario, flexible.	Costoso, requiere de técnicos para su instalación, delicado.
Transportador Mecánico de descarga	Zaranda Vibratoria	Fácil de instalar y calibrar, único que realiza separación basada en el tamaño físico, larga duración.	Posibilidad de atasco genera un alto impact sonoro.

Figura 1.2. Matriz morfológica

**DISEÑO DEL SISTEMA MECÁNICO**

El diseño del área mecánica del sistema automatizado de tratamiento térmico constituye una actividad difícil, compleja y multidisciplinaria; en la Figura 1.3 se observa el esquema del sistema automatizado de tratamiento térmico y el detalle de los principales componentes de la misma.

1. Tolva de almacenamiento.
2. Cámara de tratamiento.
3. Ventilador de recirculación.
4. Transportador de tornillo sinfín.
5. Potencia requerida por el tornillo sinfín.
6. Cilindro neumático.
7. Disco excéntrico del trasportador vibratorio.
8. Eje disco excéntrico.

9. Sistema eléctrico.

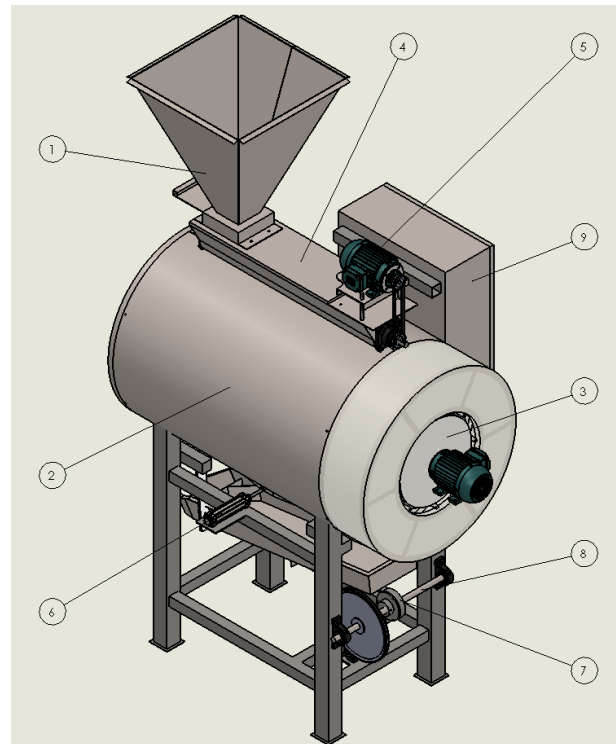


Figura 1.3. Esquema del sistema

**CAPACIDAD DE ALMACENAJE**

La capacidad de la tolva de almacenamiento y de la cámara de tratamiento viene determinada por el peso de la materia prima y su densidad.

La tolva debe almacenar 45 kg mientras que la cámara de tratamiento debe procesar 220 kg. El valor de la densidad es  $\rho = 735 \left(\frac{kg}{m^3}\right)$  y a partir de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se calcula el volumen necesario para contener las masas solicitadas.

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Ec. 1.1.

**DISEÑO TÉRMICO DE LA CÁMARA DE TRATAMIENTO**

Para el análisis térmico de la cámara de tratamiento es necesario tener claro el concepto de lo que se pretende lograr; en primer lugar se necesita elevar la temperatura de la masa total de arroz cerca de los 100°C para lo cual se requiere calcular la cantidad

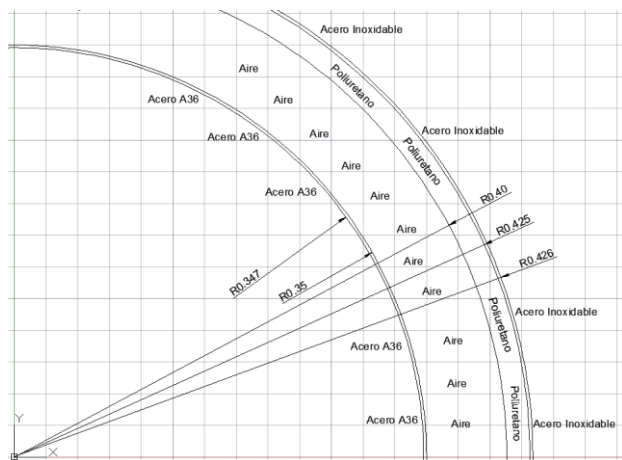
de energía requerida para que esto suceda y como segundo objetivo se necesita conocer cuál es la cantidad de energía necesaria para elevar los componentes mecánicos de la máquina, es decir, se debe calcular la energía necesaria para elevar la temperatura de la cámara y de los elementos internos.

Para el cálculo de la energía requerida para elevar la temperatura del arroz se sabe que se desea llegar aproximadamente a  $T_2 = 100^{\circ}C$  la masa de  $m = 220\text{ kg}$  y si el calor específico del arroz a 14.2% de humedad es  $C_p = 0.415 \frac{Kcal}{Kg^{\circ}C}$ , a partir de la Ec. 1.2 es posible conocer el calor transferido al arroz.

$$Q = m * C_p * (T_2 - T_1)$$

**Ec. 1.2.**

Dentro del análisis de la energía transferida a la cámara es necesario tener presente la constitución del diseño como se muestra en la Figura 1.4, la cámara consta de tres elementos; el primero la lámina de acero ASTM-A36 de un espesor de 3mm seguido de una separación de aire de 5cm y a continuación una capa de poliuretano como aislante térmico de 25.4mm de espesor; después se encuentra como cubierta exterior una lámina de acero inoxidable AISI 201 de 1,2mm de espesor.



**Figura 1.4. Esquema distribución interior**

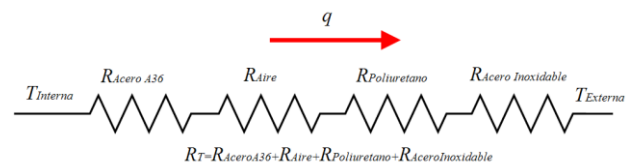
Para facilitar el cálculo de la transferencia térmica en el interior de la cámara, se realiza su analogía a un circuito eléctrico, como se indica en la Ec. 1.3, esto

gracias a la ley de Fourier y su símil eléctrico a la ley de Ohm.

$$q = \frac{\Delta T}{R_T} \rightarrow \rightarrow \rightarrow I = \frac{\Delta V}{R}$$

**Ec. 1.3.**

Una vez aclarada la similitud con los circuitos eléctricos es sencillo encontrar el circuito equivalente para el esquema de la cámara de tratamiento como se muestra en la Figura 1.5; para ello se considera que la transferencia de calor será desde el interior hacia el exterior pasando en primer lugar desde dentro de los tubos; lugar donde está contenido el arroz; hacia la plancha de acero ASTM-A36, posteriormente por la cámara horizontal con aire en convección ventilada y aislada del exterior por una capa de poliuretano y una plancha de acero inoxidable AISI 201.



**Figura 1.5. Esquema eléctrico del sistema**

El valor total de resistencia del sistema es igual a la suma de las resistencias por convección o conducción de los elementos del sistema de tratamiento Ec. 1.4.

$$R_T = R_{Acero\ A36} + R_{Aire} + R_{Poliuretano} + R_{Acero\ Inoxidable}$$

**Ec. 1.4.**

**SELECCIÓN DE ELEMENTOS**

En base a los parámetros de diseño y las necesidades del sistema se seleccionó los siguientes elementos:

- PLC Siemens S7-1214C AC/DC/RELE.
- Módulos de expansión RTD y salida análoga.
- Motor WEG W22-IE1 Standard Efficiency.
- Delta VFD-015M23A.
- Niquelina BACKER EHP INC de 2.2KW.
- Touch Panel Siemens KTP600 PN Basic.



- Cilindro neumático JSI-32X100-P
- Relé de estado sólido Q&W 40A.
- RTD PT100 y sensor capacitivo Q&W.

**IV. PRUEBAS Y RESULTADOS DEL PROCESO**

Para un mejor análisis de los resultados se enfocó el desarrollo de las pruebas en requerimientos generados mediante la operacionalización de las variables independiente y dependiente como se muestra en la Figura 1.6 y Figura 1.7 respectivamente.

Conceptualización	Dimensiones	Indicadores	Instrumento
Los sistemas alimenticios de tratamiento térmico son indispensables para garantizar la calidad, salubridad y valores nutricionales de los alimentos. Es necesario tener presente sus características técnicas para de esta manera mejorar y optimizar los procesos de producción alimenticios.	Tiempo	Horas/Tanda producción	Cronómetro
	Volumen de producción	Kg/Tanda producción	Balanza electrónica y cálculos
	Costo	Dólares	Contabilidad (Dólar Americano)




**Figura 1.6. Operacionalización variable independiente**

Conceptualización	Dimensiones	Indicadores	Instrumento
Las propiedades físicas, químicas y estructurales constituyen un aspecto fundamental en las características y calidad de los alimentos en general. Estas son de vital importancia en todas las actividades de producción, conservación y utilización de cereales, en este caso particular, las del arroz.	Humedad	%/muestra	Sensor de humedad
	Densidad	Kg/m <sup>3</sup>	Balanza electrónica y cálculos
	Porosidad	%/muestra	Cálculo mediante densidad
	Porcentaje Quiebra	%/muestra	Conteo manual




**Figura 1.7. Operacionalización de variable dependiente**

Se realizó varias pruebas en todos los ámbitos detallados anteriormente pero los resultados más relevantes se muestran en las Figura 1.8, Figura 1.9, Figura 1.10, Figura 1.11 y Figura 1.12.

En la Figura 1.8 y Figura 1.9 se observa el porcentaje de humedad en el arroz antes y después de su procesamiento térmico; se analizó cinco muestras de distintas tandas de producción y se calculó la media como el valor promedio para el análisis de los resultados obtenidos donde es apreciable la considerable reducción que existe en su porcentaje de humedad.

Número de muestra	Tipo de arroz	Valor	Representación
1	Sin procesar	16%	
5	Sin procesar	16.4%	
	Valor promedio	16.2%	

**Figura 1.8. Porcentaje humedad arroz sin procesar**

1	Procesado	10.5%	
5	Procesado	10.2%	
	Valor promedio	10.3%	

**Figura 1.9. Porcentaje humedad arroz procesado**

Para las pruebas de densidad Figura 1.10 y Figura 1.11, por limitaciones de equipo, se la realizó mediante dos pasos; el primero de ellos realizar mediciones de la masa de cinco muestras en un volumen conocido; para este caso el volumen del recipiente es 240cc y como segundo paso con el promedio de estas mediciones y un cálculo

matemático se obtuvo la densidad del arroz antes y después de ser procesado.

Número de muestra	Tipo de arroz	Valor (kg)	Representación
1	Sin procesar	0.206	
5	Sin procesar	0.208	
Valor promedio		0.205	

**Figura 1.10. Densidad arroz sin procesar**

El arroz sin procesar presenta ligeramente una masa superior que el arroz procesado, con un valor promedio de 0.205 Kg contenido en un recipiente de 240 cm<sup>3</sup> y una densidad  $\rho = 854.17 \frac{kg}{m^3}$ .



1	Procesado	0.192	
5	Procesado	0.198	
Valor promedio		0.196	

**Figura 1.11. Densidad arroz procesado**

El arroz procesado presenta una masa promedio de 0.196 Kg contenido en un recipiente del mismo volumen 240 cm<sup>3</sup>, esto se debe a la pérdida de humedad que presenta el grano durante el proceso de tratamiento térmico y una densidad de  $\rho = 816.67 \frac{kg}{m^3}$ .

La Figura 1.12 muestra el porcentaje de quiebra que presentó la muestra antes y después del tratamiento térmico, donde, a pesar de existir un ligero

incremento del mismo no representa una pérdida significativa para el proceso.

Tipo de arroz	Porcentaje de quiebra	Representación
Sin procesar	3%	
Procesado	5%	

**Figura 1.12. Porcentaje de quiebra**

La Figura 1.13 muestra un análisis comparativo entre los sistemas convencionales de procesamiento térmico (hornos con quemadores de GLP) y el sistema diseñado, para este análisis se consideraron las dimensiones de la máquina y su capacidad de procesamiento por lo cual lo correcto fue considerar un volumen similar para los sistemas convencionales de producción, es decir el análisis realizado estudia a ambos sistemas en condiciones iguales de producción.

Variable	Sistema tradicional	Sistema propuesto
Humedad	10.6%	10.3%
Densidad	833.33 kg/m <sup>3</sup>	816.67 kg/m <sup>3</sup>
Porosidad	42.35%	43.52%
% Quiebra por muestra	7%	5%
Tiempo	19h:45m:00s	6h:10m:00s
Volumen de producción	225kg	225Kg
Costo	\$500	\$5400

**Figura 1.13. Análisis comparativo**

## V. CONCLUSIONES

- Se redujo el tiempo de procesamiento en un 70% comparado con los sistemas tradicionales de tratamiento, gracias a la implementación de un sistema de control que garantiza el funcionamiento y cumplimiento de los parámetros en los tiempos preestablecidos.

- Se disminuyó el porcentaje de humedad en un 6% entre el arroz procesado y el arroz sin someterse al tratamiento térmico.
- Se afectó la densidad en el arroz tratado térmicamente en un 5% influyendo directamente a la masa final del producto; el peso final que presenta el producto se reduce ligeramente comparado con el inicial.
- Con el procesamiento térmico se presenta un cambio en el color y apariencia del grano de arroz, pasando de un tono blanco y pálido a un color crema y ligeramente amarillento.
- La uniformidad y forma del grano no presenta cambio alguno antes, durante ni después del procesamiento térmico, siendo un factor favorable y siempre deseable en los sistemas convencionales pero muy pocas veces alcanzado.
- El despliegue de la función de la calidad y su herramienta “Casa de la Calidad” colaboró de gran manera para obtener un diseño adecuado; definiendo, identificando y filtrando los requerimientos del cliente y las necesidades técnicas del diseñador a ser plantadas en el producto final.
- El análisis por matriz morfológica facilitó la selección de la opción más adecuada para solucionar los determinados requerimientos y problemas presentes durante el diseño; junto con el desarrollo de la matriz de evaluación se pudo comparar las distintas opciones y seleccionar las más viables y lógicas para la optimización del diseño.
- El sistema de tratamiento térmico automatizado cumple con el objetivo principal que es modificar las propiedades físico-químicas del arroz pilado gracias a la variación de temperatura y tiempo en un ambiente controlado asegurando un producto de calidad y apto para cumplir los requerimientos y exigencias del mercado nacional.

## VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Bhattacharya, K. R., Desikachar, H. S., & Subrahmanya. (1964). Curing of

freshly harvested rice by heat treatment. *Indian J Technology*, 378-380.

- [2] Chakraverty, A., & Singh, P. R. (2014). *Postharvest Technology and Food Process Engineering*. New York: CRC Press Taylor & Francis Group.
- [3] Desikachar, H. S., & Subrahmanyan, V. (1960). The relative effects of enzymatic and physical changes during storage on the culinary properties of rice. *Cereal Chem*, 1-8.
- [4] Kshirod, B. R. (2011). *Rice quality A guide to rice properties and analysis*. Cambridge, UK: Woodhead Publishing Limited.
- [5] Kunze, O. R., Lan, Y., & Wratten, F. T. (2004). Physical and mechanical properties of rice. *Rice Chemistry and Technology*, 191-221.
- [6] Landires, D. G., Márquez, G. C., & Cornejo, F. (2013). *Análisis del Contenido Amilosa- Amilopectina en seis Variedades de Arroz Ecuatoriano*. Guayaquil: Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL).
- [7] Siddhartha, R. (2008). *Introduction to materials handling*. Kolkata: New Age International Limited.
- [8] Zhou, Z., Robards, K., Helliwell, S., & Blanchard, C. (2001). Ageing of Stored Rice: Changes in Chemical and Physical Attributes. *Journal of Cereal Science* 33, 1-15.

## BIOGRAFÍA



**Edgar Rivera.** Nació el 24 de Julio de 1990 en Ambato provincia de Tungurahua en Ecuador. Es graduado de Ingeniero en Mecatrónica de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE en el año 2015. Áreas de Interés: Automatización Industrial, Robótica Industrial, Software CAD/CAM, Visión Artificial, Sector Agroindustrial. E-mail:

rivesantyed@icloud.com, xr\_santy@hotmail.com.