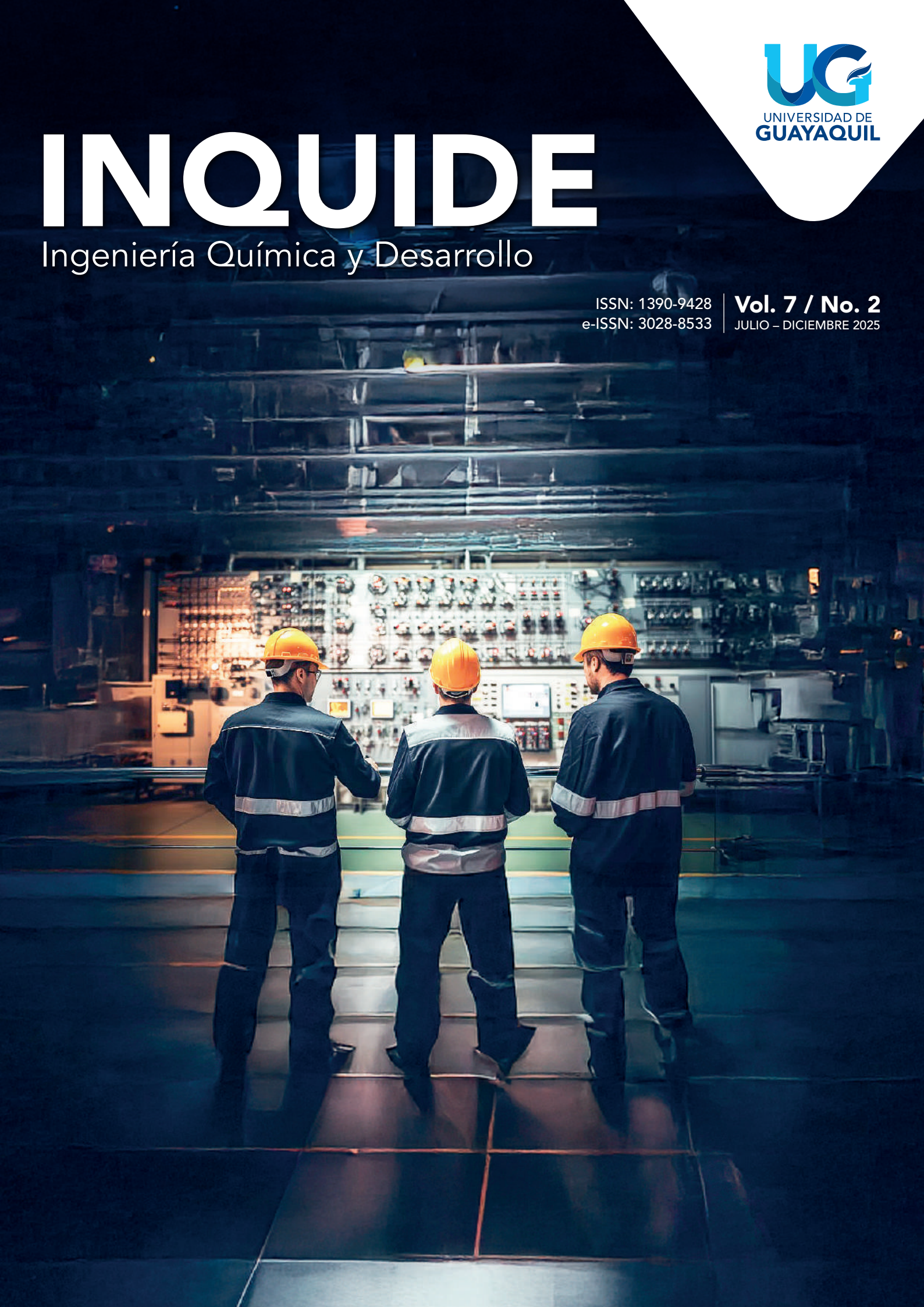


INQUIDE

Ingeniería Química y Desarrollo

ISSN: 1390-9428
e-ISSN: 3028-8533

Vol. 7 / No. 2
JULIO – DICIEMBRE 2025



INQUIDE – Ingeniería Química y Desarrollo

INQUIDE – Ingeniería Química y Desarrollo * Volumen 7 * Número 1 * enero / junio 2025. Revista de Ciencia y Tecnología, editada por la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad de Guayaquil del Ecuador. Publicación dedicada a estudios multidisciplinarios en la ingeniería

Comité Ejecutivo:

Francisco Morán Peña, PhD, Universidad de Guayaquil, Ecuador. Rector de la Universidad de Guayaquil. <https://orcid.org/0000-0003-3655-6003>

Sofía Lovato Torres, PhD, Universidad de Guayaquil, Ecuador. Vicerrector Académico de la Universidad de Guayaquil. <https://orcid.org/0000-0001-5831-8554>

Luz Elvira Vásquez Luna, PhD, Universidad de Guayaquil, Ecuador. Decano de Investigación, Posgrado e Internacionalización, Universidad de Guayaquil. <https://orcid.org/0000-0001-8709-2072>

Amalin Ladayse Mayorga Albán, PhD, Universidad de Guayaquil, Ecuador. Coordinador de Investigación y Gestión del Conocimiento de la Universidad de Guayaquil <https://orcid.org/0000-0002-3667-0888>

Sandra Ronquillo Castro, PhD, Universidad de Guayaquil, Ecuador. Decano de la Facultad de Ingeniería Química, Universidad de Guayaquil, Ecuador. <https://orcid.org/0000-0002-9048-8454>

Hugo Pérez Benítez, MSc. Universidad de Guayaquil, Ecuador. Vicedecano de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad de Guayaquil, Ecuador. <https://orcid.org/0000-0001-7460-4032>

Francisco Javier Duque-Aldaz, MSc. Universidad de Guayaquil, Ecuador. Editor General de la Revista de Ingeniería y Desarrollo Químico de la Universidad de Guayaquil. <https://orcid.org/0000-0001-9533-1635>

Miembro del Comité Científico Internacional

José Carmona Tapia, PhD, Universidad de Almería; España. <https://orcid.org/0000-0001-9319-4382>

Raúl Alfredo Sánchez Ancajima, PhD, Universidad Nacional de Tumbes; Perú. <https://orcid.org/0000-0003-3341-7382>

Raúl Guinovart Díaz, PhD, Universidad de La Habana, Cuba. <https://orcid.org/0000-0001-7702-6063>

Ricardo Sánchez Casanova, PhD, Universidad de La Habana, Cuba. <https://orcid.org/0000-0001-5354-6873>

Félix Genaro Cabezas García; MSc. Mohawk College Hamilton, Ontario; Canadá. <https://orcid.org/0000-0003-3595-3584>

Fernando Raúl Rodríguez Flores, MSc Universidad de La Habana, Cuba. <https://orcid.org/0009-0002-8275-7631>

Miembro del Consejo Editorial

Armando Fabrizio López Vargas, PhD, Universidad Politécnica Salesiana; Ecuador. <https://orcid.org/0000-0001-6520-8011>

Patricio Javier Cáceres Costales, PhD. Escuela Superior Politécnica del Litoral; Ecuador. <https://orcid.org/0000-0002-4651-4387>

Aristides Reyes Bacardí; Maestría en Ciencias de la Universidad Estatal de Milagro; Ecuador. <https://orcid.org/0000-0002-3154-2000>

Leonor Alejandrina Zapata Aspiazu; MSc. Universidad Técnica de Babahoyo; Ecuador. <https://orcid.org/0009-0003-1497-2273>

Genaro Eliceo Díaz Solís; MSc. Universidad Politécnica Salesiana; Ecuador. <https://orcid.org/0009-0003-3963-9039>

Ana Fabiola Terán Alvarado; MSc. Universidad Politécnica Salesiana; Ecuador. <https://orcid.org/0000-0002-4092-8001>

Luis Ángel Bucheli Carpio; MSc. Universidad Estatal de Milagro; Ecuador. <https://orcid.org/0000-0003-2277-603X>

Edwin Ronny Haymacaña Moreno; MSc. Instituto Superior Tecnológico Argos; Ecuador. <https://orcid.org/0000-0002-8708-3894>

William Efrén Villamagua Castillo; MSc. Universidad de Guayaquil; Ecuador. <https://orcid.org/0000-0002-1163-9606>

Editor General

Francisco Javier Duque-Aldaz, MSc.

Editorial

Facultad de Ingeniería Química de la Universidad de Guayaquil (Guayaquil – Ecuador)

Copyright. INQUIDE – Ingeniería Química y Desarrollo / 2025, Universidad de Guayaquil. Se permite la reproducción total o parcial de esta revista citando la fuente.



INQUIDE

*Ingeniería Química
y Desarrollo*

INQUIDE

Ingeniería Química y Desarrollo

Volumen 7 – Numero 1

enero – junio 2025

ISSN electrónico: 3028-8533

La administración de INQUIDE – Ingeniería Química y Desarrollo se realiza a través de
los siguientes parámetros:

La revista utiliza el sistema antiplagio académico:



Los artículos cuentan con código de identificación (Digital Object Identifier)



El proceso editorial se gestiona a través del Open Journal System



Es una publicación de acceso abierto (Open Access) con licencia Creative Commons



Los artículos de la presente edición pueden consultarse en

<https://revistas.ug.edu.ec/index.php/iqd/index>

Facultad de Ingeniería Química

Universidad de Guayaquil

INQUIDE – Ingeniería Química y Desarrollo está indexada en las siguientes Bases de Datos y sistemas de información:

Base de Datos Selectivas



Directorios Selectivos.



Buscador de Literatura Científica Open Acces.



Plataformas de Evaluación de Revistas



Hemerotecas Selectivas



Herramienta de métricas web





Carta del Editor

Presentación. -

Volumen 7, Número 2 – INQUIDE: Ingeniería Química y Desarrollo

Estimados lectores e investigadores:

Es un honor presentar el segundo número del Volumen 7 de INQUIDE: Ingeniería Química y Desarrollo, revista que consolida su compromiso con la divulgación de investigaciones innovadoras en las distintas áreas de la ingeniería y afines. En esta edición, se reúnen cinco contribuciones científicas que abordan desafíos tecnológicos, energéticos y ergonómicos, destacando soluciones prácticas con impacto industrial y ambiental.

El primer artículo, "Análisis del poder calorífico de pellets y briquetas en el aprovechamiento del pseudotallo de Plátano (*Musa paradisiaca*)", explora el potencial energético de biocombustibles sólidos derivados de biomasa agrícola. Los resultados demuestran un alto poder calorífico en pellets (22,657 MJ/kg) y briquetas (22,680 MJ/kg), cumpliendo con normas internacionales como ENplus y NTC 2060, lo que posiciona estos biocombustibles como alternativas viables para la generación de energía renovable.

En el segundo trabajo, "Diseño térmico-hidráulico de un intercambiador de calor multi-tubo para el calentamiento de metanol", se presenta el diseño detallado de un equipo clave en procesos industriales. El estudio calcula parámetros críticos como el coeficiente global de transferencia de calor ($575,17 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) y el área requerida ($2,025 \text{ m}^2$), validando su eficiencia con caídas de presión inferiores a los límites máximos establecidos.

La tercera contribución, "Diseño térmico-hidráulico de un intercambiador de calor de doble tubo aletado para el enfriamiento de acetona", profundiza en la optimización de intercambiadores de contracorriente. Con una carga térmica de 276 030 W y un factor de limpieza de 0,359, el diseño propuesto garantiza un rendimiento óptimo en condiciones de flujo turbulento, destacando su aplicabilidad en la industria química.

El cuarto artículo, "Propuesta Ergonómica Integral para la Reducción de Riesgos Musculoesqueléticos en la Producción de Jabones", aborda un tema crítico en la salud laboral. Mediante análisis estadísticos y evaluaciones posturales, se identifican riesgos como posturas forzadas (67% de trabajadores) y manipulación de cargas (33%), proponiendo soluciones prácticas para mejorar la productividad y bienestar en entornos industriales.

Finalmente, el quinto estudio, "Aplicación de estrategias Lean no automatizadas para la mejora de la calidad en procesos de ensamblaje manual", demuestra cómo intervenciones de bajo costo, como estandarización visual y eventos Kaizen, pueden reducir defectos en un 3,25% en líneas de ensamblaje manual, ofreciendo un modelo replicable para industrias con recursos limitados.

Invitación a los lectores. -

Esta edición de INQUIDE ofrece una mirada multidisciplinaria a problemas reales, combinando rigor científico con aplicabilidad industrial. Se invita a los lectores a explorar estos artículos, que no solo enriquecen el conocimiento académico, sino que también proporcionan herramientas valiosas para profesionales de la ingeniería, investigadores y tomadores de decisiones.

Llamado a colaboradores. -

INQUIDE renueva su convocatoria a la comunidad científica para enviar trabajos originales que contribuyan al avance de la ingeniería química y disciplinas relacionadas. La revista se compromete a ofrecer un proceso editorial riguroso y transparente, garantizando la difusión de investigaciones de alta calidad con impacto global. Los autores interesados pueden contribuir al próximo volumen, ampliando las fronteras del conocimiento en un espacio de diálogo científico inclusivo y colaborativo.

Sin más, les deseamos una feliz lectura y les agradecemos su apoyo a nuestra revista.

Atentamente,

Francisco Javier Duque-Aldaz.
Director - Editor
INQUIDE.
Ingeniería Química y Desarrollo

ÍNDICE

Artículos Científicos.

- Análisis del poder calorífico de pellets y briquetas en el aprovechamiento del pseudotallo de Plátano (Musa paradisiaca).....** 7
Analysis of the calorific value of pellets and briquettes in the utilization of plantain pseudostems (Musa paradisiaca).
Sandra Emperatriz Peña Murillo; Eddie Manuel Zambrano Nevárez; Sandra Elvira Fajardo Muñoz; Nahir Alondra Pérez Ortiz; Darla Rosario Vaca Choez; Pablo Fajardo Echeverri
- Diseño térmico-hidráulico de un intercambiador de calor multi-tubo para el calentamiento de metanol 17**
Thermo-hydraulic design of a multi-tube heat exchanger for methanol heating.
Amaury Pérez Sánchez; Zamira María Sarduy Rodríguez; Arlenis Cristina Alfaro Martínez; Elizabeth Ranero González; Eddy Javier Pérez Sánchez
- Diseño térmico-hidráulico de un intercambiador de calor de doble tubo aleteado para el enfriamiento de acetona..... 26**
Thermo-hydraulic design of a finned tube double-pipe heat exchanger for acetone cooling.
Amaury Pérez Sánchez; Elizabeth Elianne Artigas Cañizares; Laura Thalia Alvarez Lores; Elizabeth Ranero González & Eddy Javier Pérez Sánchez.
- Propuesta Ergonómica Integral para la Reducción de Riesgos Musculoesqueléticos en la Producción de Jabones: Un Enfoque Basado en Análisis Estadístico y Evaluación Postural..... 38**
Comprehensive Ergonomic Proposal for the Reduction of Musculoskeletal Risks in Soap Production: An Approach Based on Statistical Analysis and Postural Assessment.
Genesis Elizabeth Castro Rosales; Ashly Dayanna Torres Alvarado; Luis Stalin Zalamea Cedeño; Francisco Javier Duque-Aldaz & Fernando Raúl Rodríguez-Flores.
- Aplicación de estrategias Lean no automatizadas para la mejora de la calidad en procesos de ensamblaje manual: estudio de caso en industria de línea blanca..... 51**
Application of non-automated Lean strategies for quality improvement in manual assembly processes: a case study in the white goods industry.
Jayling Selena Fu-López; Jaime Patricio Fierro Aguilar; Fernando Raúl Rodríguez-Flores Francisco Javier Duque-Aldaz



Análisis del poder calorífico de pellets y briquetas en el aprovechamiento del pseudotallo de Plátano (*Musa paradisiaca*).

*Analysis of the calorific value of pellets and briquettes in the utilization of plantain pseudostems (*Musa paradisiaca*).*

Sandra Emperatriz Peña Murillo ^{1*}; Eddie Manuel Zambrano Nevárez ²; Sandra Elvira Fajardo Muñoz ³; Nahir Alondra Pérez Ortiz ⁴; Darla Rosario Vaca Choez ⁵; Pablo Fajardo Echeverri ⁶.

Recibido: 12/09/2024 – Aceptado: 20/04/2025 – Publicado: 01/07/2025

Artículos de
Investigación



Artículos de
Revisión



Artículos de
Ensayos



* Autor para correspondencia.



Resumen.

Los biocombustibles sólidos pertenecen a la segunda generación de acuerdo con el tipo de biomasa, obteniéndose de desechos agrícolas, forestales e industriales como el pseudotallo de plátano que es una biomasa lignocelulósica la cual se puede emplear como una alternativa para la generación de energía renovable en forma de pellets y briquetas debido a sus propiedades energéticas. El objetivo de estudio es determinar la eficiencia del poder calorífico de los biocombustibles sólidos en base al pseudotallo de Plátano (*Musa paradisiaca*). La metodología de estudio se dividió en 3 partes: (1) Obtención y acondicionamiento de la biomasa, (2) elaboración de Biocombustibles Sólidos y (3) el análisis físico, proximal, potencial energético de la biomasa y el ANOVA respectivo de pellet y briketa. Encontrándose un alto poder calorífico para las composiciones 55-45% en pellet con 22,657 MJ/Kg y 50-50% en briketa con 22,680 MJ/kg, cumpliendo con los parámetros establecidos en las normas ENplus y NTC 2060 respectivamente.

Palabras clave.

Pseudotallo, Biomasa, Poder Calorífico, Pellet y Briketa.

Abstract.

Solid biofuels belong to the second generation according to the type of biomass obtained from agricultural, forestry, and industrial wastes, such as banana pseudostem, which is a lignocellulosic biomass that can be used as an alternative for the generation of renewable energy in the form of pellets and briquettes due to its energetic properties. The study aims to determine the calorific value efficiency of solid biofuels based on Plantain (*Musa paradisiaca*) pseudostem. The study methodology was divided into three parts: (1) obtaining and conditioning of biomass, (2) elaboration of solid biofuels, and (3) physical, proximal, and energy potential analysis of biomass and the respective ANOVA of pellets and briquettes. A high calorific value was found for the compositions 55-45% in pellet with 22,657 MJ/kg and 50-50% in briquette with 22,680 MJ/kg, complying with the parameters established in the ENplus and NTC 2060 standards, respectively.

Keywords.

Pseudostem, Biomass, Calorific value, Pellet and Briquette.

1. Introducción

Ecuador, es un país que produce grandes cantidades de biomasa y residuos lignocelulósicos por año, que no son aprovechados en su totalidad en el área agrícola, aun cuando, la biomasa es de gran importancia en la generación de energía limpia ya que se explora como alternativa de materia prima para la producción de biocombustibles sólidos. Por lo tanto, la biomasa es un recurso disponible, el cual tiene ventajas como su facilidad de combustión, contenido de celulosa y neutra emisión de carbono [1].

De acuerdo, al Atlas Bioenergético del Ecuador empleo la base de datos de ESPAC, en 2012 tuvo una productividad de 559 319 ton/año, donde 372 576 t/año corresponde a residuos de campo (Hojas, pseudotallo), de la cual se obtuvo un Poder calorífico Inferior (PCI) de 4,180 TJ/kg. Sin embargo, según la INEN en 2022, Ecuador registro 133 145

h de superficie plantada, dando una cosecha de 114 526 h, obteniendo una producción de 857 561,89 toneladas métricas [2]. Se estima que de una planta de plátano que pesa alrededor de 100 kg se obtiene 88% que representa a los residuos totales y el racimo un 12%, dando una relación entre residuos de la cosecha y el racimo es de 2:1 [3], [4]. Los residuos lignocelulósicos generados, son las partes de los cultivos de especies vegetales desechados en el período de cosecha, que no son empleados para el consumo [5], por lo que en el sector agrícola se estiman 1,44 MMt de biomasa anual, sin embargo, en el sector forestal se producen 0,22 MMt/año [6].

Nuestro país, tiene gran demanda de exportación de plátano verde, cual procede del género *Musa* de la familia *Musaceae*, de la especie *paradisiaca* L. Es una planta

¹ Universidad de Guayaquil; sanda.penam@ug.edu.ec ; <https://orcid.org/0000-0002-7848-8021> ; Guayaquil – Ecuador.

² Universidad de Guayaquil; eddie.zambranon@ug.edu.ec ; <https://orcid.org/0000-0003-0358-0402> ; Guayaquil – Ecuador.

³ Universidad de Guayaquil; sandra.fajardom@ug.edu.ec ; <https://orcid.org/0000-0002-2127-0777> ; Guayaquil – Ecuador.

⁴ Investigador Independiente; nahirperez11@hotmail.com ; Guayaquil - Ecuador.

⁵ Investigador Independiente; darlavaca22@outlook.es ; Guayaquil – Ecuador.

⁶ Universidad del Valle; pablo.fajardo@correounivalle.edu.co ; <https://orcid.org/0000-0001-5257-0548> ; Cali – Colombia.

herbácea de gran tamaño, que está compuesto por un rizoma, un pseudotallo, hojas, flores y fruto (racimo) [7]. Aproximadamente para obtener una tonelada de racimos de verde, se produjo de raquis 150 kg, de hojas 480 kg y el pseudotallo 3 toneladas, por lo que estos residuos son empleados como abono y alimento para animales [8].

El pseudotallo que se presenta en grandes cantidades de biomasa residual. Es un tallo formado de vainas anchas, su tamaño varío de 3,5 a 6 m y pesa alrededor de 50 kg. Esta estructura está compuesta por compuestos lignocelulósicos como: Celulosa, lignina, hemicelulosa y otros compuestos químicos (K, Na, Ca, Mn, P). Por sus propiedades puede emplearse como biomasa para la generación de energía, mediante la producción de biocombustibles y así contribuir con la disminución de emisiones de los gases que contaminan el ambiente. En la actualidad, Ecuador se ha dedicado a adoptar energías renovables como parte habitual de su suministro energético, y el empleo de biomasa representa el 1,99% de la producción de electricidad [9].

Este artículo de investigación trata sobre el empleo de la biomasa de *Musa paradisiaca* para la producción de biocombustible sólido en forma de pellet y de briqueta, para reducir los contaminantes que producen los combustibles fósiles eligiendo esta alternativa de remplazo para además, reducir la erosión del suelo, desertización, degradación de bosques y cultivos ya que, proporcionan una combustión limpia. Se utilizará los estándares de calidad establecido en las normas Enplus y NTC 2060 respectivamente. Además, se empleó la norma ASTM 3172-89 para los análisis proximales de biomasa y biocombustible sólido [10]. Por eso el objetivo de estudio es Determinar la eficiencia del poder calorífico de los biocombustibles sólidos en base al pseudotallo de Plátano (*Musa paradisiaca*).

1.1. Pseudotallo de Plátano

El pseudotallo tiene un peso cercano a los 50 kilogramos y su longitud oscila entre 3,5 y 7,5 metros, siendo su función principal sostener las hojas que emergen en la parte superior y el racimo. Estas hojas, de tono verde oscuro y considerable extensión, miden alrededor de 2 a 4 metros de longitud por 1,5 metros de ancho [11]. Su estructura se asemeja a un tronco de árbol, es de naturaleza herbácea y suelen tener un aspecto robusto y grueso debido a la acumulación de fibras vegetales. A diferencia de los árboles, los plátanos no tienen un tronco de madera sólido, en su lugar, el pseudotallo está compuesto por hojas dispuestas en capas concéntricas, que se superponen unas a otras. El pseudotallo también cumple la función de almacenar nutrientes y agua para el crecimiento de la planta [12].

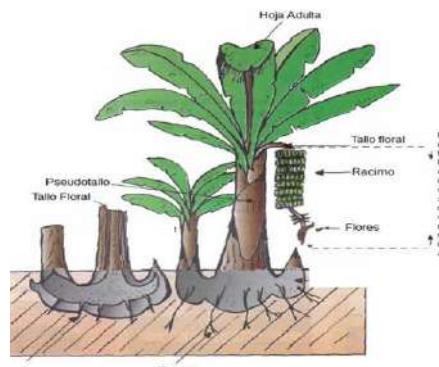


Figura 1 Planta de Plátano. Fuente: [13].

El cultivo de plátano en el Ecuador es de 128.861 hectáreas plantadas, el cual está repartido en 21 provincias como se muestra en la Figura 2, señala la producción de plátano a nivel nacional se obtuvo 763.455 toneladas.

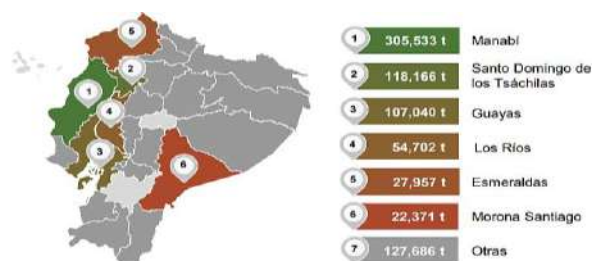


Figura 2 Distribución de producción. Fuente: [14].

A diferencia, en 2022 se registró en 133.145 hectáreas plantadas, como se observa en la Figura 3, se obtiene el tercer lugar en superficie plantada, se logrando una producción de 857.561,89 toneladas métricas y un rendimiento del 7,49 en toneladas/ hectáreas, el cual es el cuarto lugar en cultivos permanentes en el Ecuador. [2] [15].

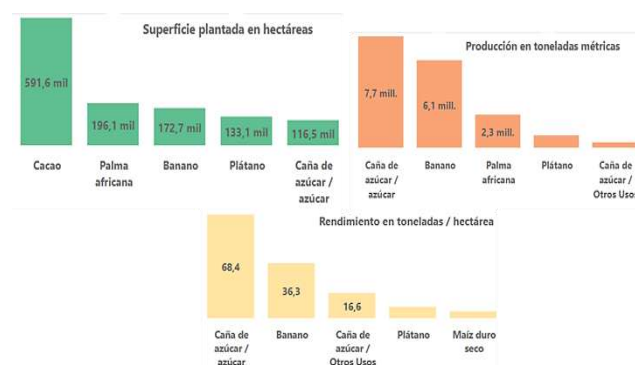


Figura 3 Superficie plantada de Plátano en el Ecuador 2022. Fuente: [2].

1.2. Biocombustible

Son carburantes que se fabrican con biomasa, lo que permite disminuir las emisiones de los gases invernadero, solo si sus procesos son sustentables, es decir que emitan una pequeña huella de carbono. En la generación de energía por combustión, la biomasa utilizada debe poseer porcentajes bajos de lignina, para de esta manera producir menores

cantidades de residuos carbonosos, de no ser así la degradación térmica producirá grandes cantidades de los mismos [1]. Estos biocombustibles se clasifican de acuerdo con su generación:

- Los biocombustibles de primera generación utilizan biomasa proveniente de cultivos agrícolas alimentarios.
- La segunda generación emplea biomasa lignocelulósica procedente de desechos forestales, agrícolas y urbanos.
- La tercera generación, su biomasa es de origen de especies no comestibles.
- Por último, la cuarta generación se fabrica de microorganismos modificados genéticamente [16].

También los biocombustibles se dividen de acuerdo con su estado en: Líquidos (Bioetanol, biodiesel, bioaceites), Sólidos (Pellet, astillas, briquetas, carbón) y Gaseosos (biogás, biometano, biohidrógeno) [17].

Esta investigación se enfoca en los biocombustibles sólidos (pellet y briqueta) que pertenecen a la segunda generación lo cual permite una huella de carbono nula, debido a que su materia prima son residuos lignocelulósicos que es una fuente biológica no explorada en su totalidad, la cual sería una gran alternativa de biomasa para la producción de biocombustibles [18].

1.3. Biocombustibles Sólidos

Los biocombustibles sólidos son formas de combustible elaboradas a partir de material orgánico de origen vegetal o animal que pueden emplearse en distintas aplicaciones para la generación de energía. Se adquieren a través de métodos físicos como compresión, astillado o trituración [19].

Específicamente, en la generación de energía eléctrica y térmica, se utilizan biocombustibles sólidos producidos a partir de los restos de biomasa de operaciones forestales o agroindustriales. La relevancia de los biocombustibles sólidos se encuentra en su gran capacidad para satisfacer las necesidades energéticas relacionadas con el aumento de la población. La utilización de biocombustibles sólidos posibilitará sustituir a los combustibles fósiles en la generación de electricidad y calor, al mismo tiempo que reducirá los inconvenientes ocasionados por los combustibles tradicionales [16]. Dentro de la gama de biocombustibles sólidos se encuentran las astillas, briquetas y pellets, los cuales son formas compactas con una alta capacidad calorífica [20].

Los principales componentes empleados en la producción de biocombustibles sólidos son derivados de materiales lignocelulósicos, los cuales provienen de la agricultura o la silvicultura, por ello los desechos provenientes de la agroindustria tienen múltiples usos potenciales, incluyendo la creación de abono orgánico o la fabricación de biocombustibles [16].

Tabla 1 Tipos de Biocombustibles Sólidos.

Tipos	Proviene/fuente	Uso
Astilla	Residuos agrícolas y forestales. Cultivos leñosos. Residuos Agroalimentarios.	Hornos de panadería, cerámicos, en pequeñas industrias, viviendas y calefacción.
Carbón Vegetal	Madera y residuos vegetales.	Doméstico.
Pellet y Briqueta	Industria Maderera. Ejemplo: Teca, alfalfa, etc.	Combustible: en áreas industriales y de envergadura.

Nota: Información obtenida de [21]. Fuente: [22].



Figura 4 Tipos de Biocombustibles Sólidos. Fuente: [21].

A continuación, algunas características de pellet y briquetas.

1.3.1. Pellet

Son de biocombustibles de forma cilíndrica, de diferente tipo de biomasa de la cual va a depender su color (vegetal, animal, residuos sólidos agroindustriales y urbanos), donde su rango de dimensiones es: diámetro de 6-8 mm y de 3,15-40mm de longitud. Donde la propiedad fundamental es el poder calorífico $\geq 16,5 \frac{MJ}{Kg}$. Otras propiedades son su porcentaje de humedad de $\leq 10\%$ este valor determina la cantidad de energía que producirán los pellets cuando sean sometidos a combustión, e otras palabras, si el contenido de agua es alto, en la combustión se eliminará primero esta y luego se producirá calor obteniéndose un bajo poder calorífico [23]. Además, la ceniza debe ser $\leq 0,7\%$ y una densidad aparente de $600 \frac{Kg}{m^3} - 750 \frac{Kg}{m^3}$, estas propiedades son de acuerdo a la Norma En Plus [24].



Figura 5 Pellets. Nota: Pellets producidos de cascarilla de Arroz. Fuente: [25].

1.3.2. Briquetas

Son bloques sólidos de forma variada (las más utilizadas rectangular y redonda), las cuales poseen un diámetro superior a 5 cm y una longitud entre. Donde la propiedad fundamental es el poder calorífico de $12.500-21.000 \frac{MJ}{Kg}$. Otras propiedades son su porcentaje de humedad de 2,5% y ceniza 30% estas propiedades son de acuerdo a la Norma Colombiana [26].



Figura 6 Briqueetas. Nota: Briqueetas de diferentes materias y formas. Fuente: [27].

1.4. Biomasa

Es un tipo de energía renovable que se obtiene a partir de la materia orgánica, como los residuos agrícolas, forestales, alimentos, estiércol, entre otros. Esta materia orgánica se puede utilizar como combustible para la generación de calor, electricidad y biocombustibles (Tepale Gómez, 2020). Además, la biomasa es una fuente de energía renovable, ya que proviene de organismos biológicos que pueden ser cultivados y regenerados en un período de tiempo relativamente corto [20]. Esto la convierte en una opción sostenible para la producción de energía, a diferencia de los recursos fósiles que son limitados y no se pueden regenerar [28].

Otro beneficio de la biomasa es que su procesamiento y utilización no requiere de tecnologías complejas. Puede utilizarse directamente en forma de leña, pellets o briquetas, o puede convertirse en diferentes formas de energía como electricidad, calor o biogás a través de procesos de combustión, gasificación o fermentación [6].

El uso de la biomasa como recurso energético tiene varias ventajas en comparación con el petróleo, carbón y gas [6]:

- Mejora de la situación socio-económica de las áreas rurales: El aprovechamiento de los residuos agrícolas para generar energía a partir de biomasa puede generar empleo e ingresos en las zonas rurales, impulsando el desarrollo económico de estas áreas [6].

- Reducción de emisiones contaminantes: Al utilizar biomasa en lugar de combustibles fósiles, se reducen las emisiones de contaminantes como azufre, partículas, monóxido de carbono (CO), metano (CH₄) y óxidos de nitrógeno (NO_x), lo cual tiene un impacto positivo en la calidad del aire y la salud pública [6].

- Ciclo neutro de CO₂: La biomasa tiene la ventaja de ser un recurso renovable y su combustión no contribuye al efecto invernadero de manera significativa, ya que el dióxido de carbono (CO₂) liberado durante la quema es el mismo que fue absorbido por las plantas durante su crecimiento [29]. Esto ayuda a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y a mitigar el cambio climático.

- Potencial de América Latina y el Caribe: Estas regiones cuentan con una gran cantidad de recursos naturales y agrícolas, lo que las posiciona como potenciales productores de biomasa. El desarrollo de la bioeconomía en estas áreas puede impulsar su desarrollo socioeconómico, así como promover la seguridad energética y reducir la dependencia de los combustibles fósiles [6].

En resumen, el uso de biomasa como recurso energético presenta diversas ventajas, tanto a nivel socioeconómico como ambiental, lo que la convierte en una alternativa interesante y sostenible en comparación con los combustibles fósiles tradicionales [6].

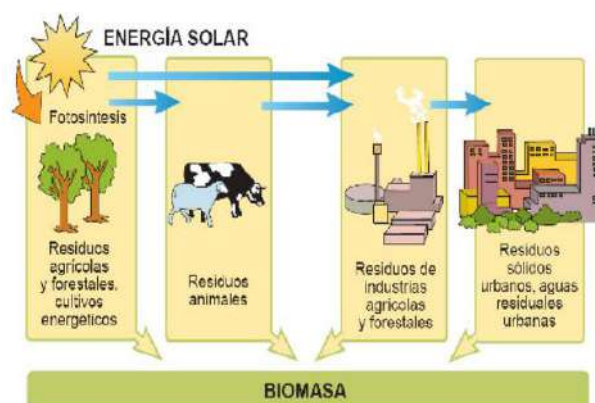


Figura 7 Biomasa. Fuente: [21].

1.5. Características

1.5.1. Contenido de Humedad

Para el ensayo se siguió el procedimiento de la normativa ASTM D-3173, en la cual se empleó la fórmula:

$$\%H = \frac{A - B}{A} * 100 \quad (1)$$

Donde:

A: gramos de muestra inicial en g.

B: gramos de muestra final en g.

1.5.2. Contenido de Ceniza

El contenido de cenizas de una masa se determina de acuerdo con la cantidad de minerales que contiene y para ello se emplea la siguiente fórmula [30].

$$\%C = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} * 100 \quad (2)$$

m_1 : Masa del crisol vacío y tapa.

m_2 : Masa del crisol y tapa + 1 g de muestra.

m_3 : Masa del crisol y tapa + la muestra calentada de la mufla.

1.5.3. Densidad

Para esta prueba se pesó los biocombustibles y se obtuvo su volumen determinado, para luego aplicar la siguiente ecuación:

$$d = \frac{m}{v} \quad (3)$$

d= densidad

m = masa

v =volumen

1.5.4. Poder Calorífico

Es la cantidad de energía que se puede obtener al quemar una sustancia. Se refiere a la capacidad de una sustancia para producir calor al realizar una reacción química de combustión completa [31]. El poder calorífico se mide en unidades de energía por unidades de masa como julios o calorías.

1.5.5. Material Volátil:

Este ensayo del porcentaje del material volátil se trabajó de acuerdo con la norma [32], mediante la siguiente ecuación:

$$\%MV = \left(\frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} * 100 \right) - h \quad (4)$$

m₁: Masa del crisol vacío y tapa.

m₂: Masa del crisol y tapa +1 g de muestra.

m₃: Masa del crisol y tapa + la muestra

1.5.6. Carbón Fijo

Es la resta de 100 y el resultado de la sumatoria del porcentaje de humedad, ceniza y material volátil [33].

$$C. Fijo = [100 - (H\% + C\% + MV\%)] \quad (5)$$

H: Porcentaje de humedad.

C: Porcentaje de ceniza.

MV: Porcentaje de material volátil.

2. Materiales y métodos.

Área de estudio

El área de estudio comprende el lote 9 de la urbanización Canaán I del Cantón Cumandá (Chimborazo-Ecuador).

2.1. Metodología

La metodología del estudio está dividida en 3 secciones: (1) Obtención y acondicionamiento de la biomasa (materia prima), (2) elaboración de Pellet y briqueta y (3) Métodos de Caracterización física, análisis proximal, estructural y el anova respectivo.

2.2. Obtención y acondicionamiento de la biomasa

La elección de esta biomasa se basa en su abundante disponibilidad como residuo agrícola en el Ecuador y su alto contenido de componentes lignocelulósicos, adecuados para la producción de biocombustibles sólidos. Este paso inicial también incluye un análisis de las condiciones de crecimiento de las plantas para asegurar uniformidad en las muestras, incluyendo datos de la edad de la planta, condiciones del suelo, y época de cosecha.

Las muestras de pseudotallo de plátano de las especies dominico y barraganete se recolectaron aleatoriamente después de la cosecha, luego se procedió a cortar en forma rectangular (2cmx5cm) y los trozos fueron expuestos al sol por 8 días, para reducir el contenido de humedad. Se siguió con secado de las muestras mediante una estufa a la temperatura de 60°C por 12 horas en latas de aluminio. Luego, se introdujo en un molino de martillo, con el fin de disminuir su tamaño, para después colocar en una maquina vibradora por 5 minutos, hasta que las partículas disminuyeron a un tamaño de malla de 0,8 mm, 0,63 mm y 0,315 mm. Para terminar con el acondicionamiento de la biomasa se eliminó la humedad a 100°C por 6 h.

2.2.1. Composición Química de la Biomasa

El análisis proximal, realizado según la norma ASTM D3172-89 para determinar el contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina. La composición promedio obtenida fue de 31.27% de celulosa, 15.07% de hemicelulosa y 23.9% de lignina, lo que evidencia un alto contenido energético adecuado para su uso en biocombustibles.

2.3. Elaboración de pellet y briqueta

En esta etapa se homogenizo la biomasa con el aglutinante de acuerdo con las composiciones seleccionadas donde se utilizó las siguientes cantidades de biomasa- aglutinante.

Tabla 2 Composiciones de los Biocombustibles Sólidos.

Composición	Cantidad de Biomasa (g)	Cantidad de aglutinante (g)	Cantidad de Residuo (g)	Cantidad de Biocombustibles
Pellet 50-50	26	26	2	14 Pellets
Pellet 55-45	28,6	23,4	2	13 Pellets
Pellet 60-40	31,2	20,8	3	11 Pellets
Briquetas 50-50	205	205	8	6 Briquetas
Briquetas 55-45	270,6	221,4	6	6 Briquetas
Briquetas 60-40	246	164	11	6 Briquetas

Nota: Información Obtenida de [22].

Con las cantidades empleadas en cada composición se obtuvo una masa compacta por medio de la peletizadora y briquetadora. Para finalizar con el secado al ambiente por 72 h de los pellets y las briquetas producidos.

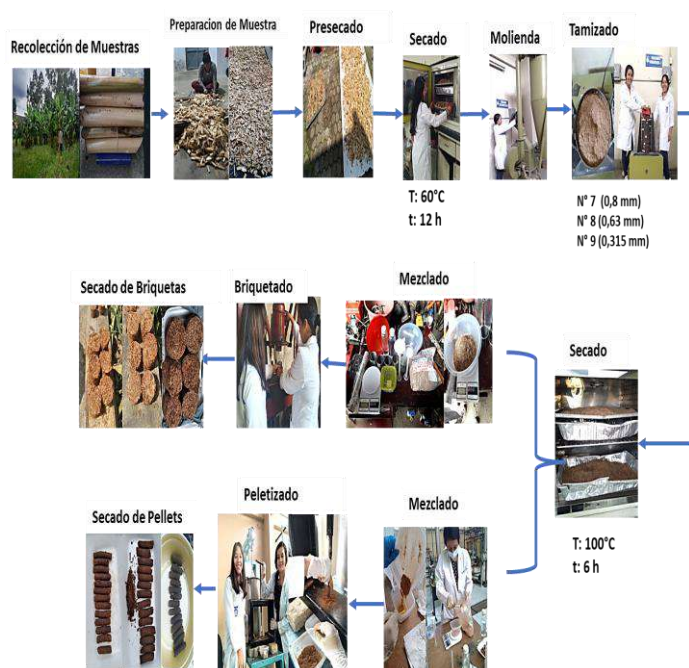


Figura 8 Diagrama de Flujo. Fuente: [22].

2.4. Métodos de caracterización física, análisis proximal, estructural y el anova.

El poder calorífico fue evaluado mediante una bomba calorimétrica bajo el estándar ASTM D5865. Este análisis incluyó la medición del contenido energético en MJ/kg de las muestras producidas en diferentes composiciones. Además, se utilizó el análisis estadístico ANOVA y la prueba post-hoc de Tukey para determinar la significancia de las diferencias entre las composiciones de pellets y briquetas.

2.4.1. Caracterización física

En esta caracterización se basó con los procedimientos de la norma ASTM S3172-89 para el contenido de humedad para la biomasa molida. En cambio, para los biocombustibles sólidos se aplicó la misma norma de contenido de humedad y se halló la densidad de estos.

Los análisis preliminares son esenciales para comprender la composición del pseudotallo. Puedes incluir un análisis de la cantidad de celulosa, hemicelulosa y lignina, que son elementos clave en el poder calorífico de la biomasa.

Basado en estudios anteriores, el pseudotallo de plátano presenta valores altos de celulosa (entre 30-60%) y lignina, lo que indica su idoneidad como biocombustible sólido.

2.4.2. Análisis proximal

Se realizó la caracterización de la biomasa molida empleando la norma ASTM D3172-89, que describe los métodos de determinación del contenido de ceniza, material volátil y carbón fijo. Para el estudio del poder calorífico se aplicó la norma ASTM D240 a cargo del laboratorio LAQUINS ESPOL.

2.4.3. Análisis Estructural

Las muestras se enviaron al laboratorio LAQUINS ESPOL, para la caracterización de lignina, celulosa y hemicelulosa. Estos análisis se realizaron según la norma TAPPI T 203 y 222.

2.4.4. Anova

Es el procedimiento estadístico utilizado para evaluar hipótesis se conoce como ANOVA y se emplea para contrastar dos o más promedios asociados a un factor común. Este método es aplicado al conjunto de datos, el cual genera variaciones, donde se somete a condiciones distintas donde se verifica si es similar o desigual. Posee hipótesis Nula y Alternativa, que para rechazarse la hipótesis nula no debe cumplir la condición de una de las medias sea diferente del resto. Y en cambio para que la hipótesis alternativa sea rechaza todas las medias deben ser iguales [34].

2.4.5. Método de Tukey

El método Tukey complementa la información obtenida de ANOVA, permitiendo comparar las medias muestrales conseguidas de un ensayo experimental. El valor T_α se calcula a partir de la siguiente ecuación (Cajal, 2022):

$$T_\alpha = q_\alpha(K, N - K) \sqrt{CM_E / n_i} \quad (6)$$

T_α = número HSD (Diferencia Honestamente Significativa)
 q_α = cuantiles de la distribución de tukey (tabla con significancia relativa de 0,05% igual a 95% de confiabilidad)

n = número de repeticiones del estudio

CM_E = factor Cuadrado Medio del Error representa el error estándar de cada promedio

La prueba tukey establece que cuando la variación entre dos medias es mayor al valor de T_α , se considera desigual, no obstante, si la diferencia es inferior se estima que es estadísticamente idéntico [35].

3. Análisis e Interpretación de Resultados.

La caracterización física, análisis proximal y estructural que presenta la biomasa molida de pseudotallo de plátano se muestra en la tabla 3.

Tabla 3 Resultados de la Caracterización de la Biomasa

Parámetro	Unidad	Resultado	Método de Análisis
*Poder calorífico	$\frac{MJ}{Kg}$	14,44	ASTM D240
Humedad	%	4,24	ASTM D3172-89
Ceniza	%	6,76	ASTM D3172-89
Material Volátil	%	80,65	ASTM D3172-89
Carbón Fijo	%	8,34	ASTM D3172-89
*Lignina	%	23,9	TAPPI T 222
*Hemicelulosa	%	12,9	TAPPI T 203
*Celulosa	%	13,7	TAPPI T 203

Nota: Los análisis se realizaron en el Laboratorio de nuestra Facultad.
 *Resultado tomado del informe del Laboratorio Laquins Espol. Fuente: [36].

Los resultados del análisis proximal de la biomasa procedente del pseudotallo de plátano, correspondientes a

4,240%, 6,761%, 80,659% y 8,3406% para el porcentaje de humedad, ceniza, material volátil y carbón fijo respectivamente, al igual que se obtuvo 14,447 MJ/Kg de poder calorífico, que conforme a la norma En plus y la norma colombiana NTC 2060 es un valor cercano al límite permisible de contenido energético para la elaboración de biocombustibles sólidos.

Por otra parte, los resultados del análisis proximal realizados a la biomasa señalaron que se obtuvo un 23,9% de lignina, representando el mayor componente del pseudotallo de plátano siguiéndole con fracciones más bajas la hemicelulosa y celulosa con los porcentajes de 12,9% y 13,7% respectivamente. Estos valores permitieron que en la etapa de mezclado se obtengan combinaciones homogéneas.

Tabla 4 Comparación de los parámetros de los resultados del Pellet con la Norma española.

Parámetro	Unidad	50%-50% 1	55%-45% 2	60%-40% 3	ENplus
*Poder calorífico	$\frac{MJ}{Kg}$	22,566	22,657	20,835	Cumple
Humedad	%	5,190	6,888	6,403	Cumple
Ceniza	%	3,641	3,425	4,248	No cumple
Material Volátil	%	87,001	86,301	86,181	-
Carbón Fijo	%	2,685	3,385	3,167	-
Densidad	$\frac{Kg}{m^3}$	750	650	273	Cumple 1 y 2

Nota: Los análisis se realizaron en el Laboratorio de nuestra Facultad.
*Resultado tomado del informe del Laboratorio Laquins Espol. Fuente: [36] y Autores.

En la Tabla 4, se especifican los resultados del análisis proximal de pellets. Dado que el contenido de humedad en los biocombustibles es un factor importante ya que a medida que este disminuye el poder calorífico aumenta, se puede deducir que esto no se ve reflejado en los pellets obtenidos, ya que conforme aumenta el contenido de humedad de 5,19% también lo hace su poder calorífico de acuerdo con las composiciones 50-50 y 55-45, lo cual significa que el calor liberado en la combustión que es utilizado para evaporar el agua, no influye desfavorablemente en el poder calorífico. Teniendo en cuenta que la composición 55-45 tiene 22,566 MJ/kg de PC se considera que los pellets cumplen con los parámetros de calidad de biocombustible sólido ideal para la producción de energía, conforme a la norma ENplus.

De acuerdo con la Norma Española, el valor de densidad de pellets debe ser mayor o igual a $600 \frac{Kg}{m^3}$, por lo tanto, las composiciones 50-50 y 55-45 obedecen a esa condición, dado que constan con una densidad de $750 \frac{Kg}{m^3}$ y $650 \frac{Kg}{m^3}$, no obstante, con los datos obtenidos del contenido de ceniza en

pellet, ninguna composición cumple con ese parámetro, sin embargo, la composición 60-40 tiene mayor porcentaje de ceniza lo que se puede relacionar con que la biomasa contenga un contenido de compuestos inorgánicos elevado. El contenido de ceniza es inversamente proporcional al poder calorífico.

Tabla 5 Comparación de los parámetros de los resultados del Briqueta con la Norma NTC.

Parámetro	Unidad	50%-50%	55%-45%	60%-40%	Norma NTC
*Poder calorífico	$\frac{MJ}{Kg}$	22,680	19,907	19,416	Cumple
Humedad	%	5,005	4,357	4,132	No cumple
Ceniza	%	2,736	3,613	4,512	Cumple
Material Volátil	%	85,576	87,425	87,4227	No cumple
Carbón Fijo	%	6,682	4,603	3,882	Cumple
Densidad	$\frac{Kg}{m^3}$	569,4	592,9	376,7	-

Fuente: [36] [22].

Como se puede observar en la tabla 5, los resultados obtenidos de las pruebas fisicoquímicas: el contenido de humedad está vinculado con el contenido energético, en este caso se visualiza que a menor contenido de humedad se obtiene menor poder calorífico, por lo que en la composición 60-40 se obtuvo mayor contenido de humedad e igual mayor contenido de energía, por lo que se considera que esta característica no afecta al poder calorífico en este tipo de biocombustible, el cual comprende que la composición 50-50 con $22,680 \frac{MJ}{Kg}$ tiene mayor contenido energético con respecto a las proporciones de 55-45 y 60-40 con $19,907 \frac{MJ}{Kg}$ y $19,416 \frac{MJ}{Kg}$ respectivamente, en cierta medida aunque los porcentajes del contenido de humedad no están dentro de los límites permisibles de la norma NTC 2060, su PC, si lo está, al igual que el contenido de ceniza.

El análisis proximal de cada briqueta indico que la composición de 55-45 tiene una mayor densidad de $592,9 \frac{Kg}{m^3}$, le sigue la proporción 50-50 con $569,40 \frac{Kg}{m^3}$ y 60-40 con un valor menor de $376,7 \frac{Kg}{m^3}$.

4. Discusión

4.1. Comparación del poder calorífico entre pellet y briqueta

Tabla 6 Biocombustible Sólido Idóneo.

Parámetro	Unidad	Pellet 50%-50%	Pellet 55%-45%	Briqueta 50%-50%	Briqueta 55%-45%
Poder calorífico	$\frac{MJ}{Kg}$	22,566	22,657	22,680	19,907

Fuente: [36].

En los pellets de la composición 55-45 se obtuvo mayor poder calorífico (PC), pero en la 50-50 disminuyó, dando

22,657 $\frac{MJ}{Kg}$ y 22,566 $\frac{MJ}{Kg}$ respectivamente. Por otra parte, en las briquetas dio alto contenido energético en la composición de 50-50 con un 22,680 $\frac{MJ}{Kg}$, en cambio en la 55-45 se redujo a 19,907 $\frac{MJ}{Kg}$. Por lo tanto, se considera que la utilización del pseudotallo de plátano como biomasa para el aprovechamiento energético dio un resultado óptimo en la briqueta de composición 50-50, de acuerdo con el PC.

Cabe considerar, que la configuración 55-45 de pellet no tiene variación significativa en el PC en comparación a la composición 50-50 briqueta, por ello se consideró que la *Musa paradisiaca* es apta como materia prima para la producción de biocombustibles sólidos en las proporciones mencionadas.

Tabla 7 Varianza de resultados de poder calorífico de pellets.

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Composición 50-50%	3	67,697	22,56566667	1,23333E-05
Composición 55-45%	3	67,972	22,65733333	1,23333E-05
Composición 60-40%	3	62,506	20,83533333	1,23333E-05

Fuente: [22].

Tabla 8 ANOVA.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	6,32214022	2	3,16107011	256302,98	1,60E-15	5,14325285
Dentro de los grupos	7,4E-05	6	1,23333E-05			
Total	6,32221422	8				

Fuente: [22].

Decisión

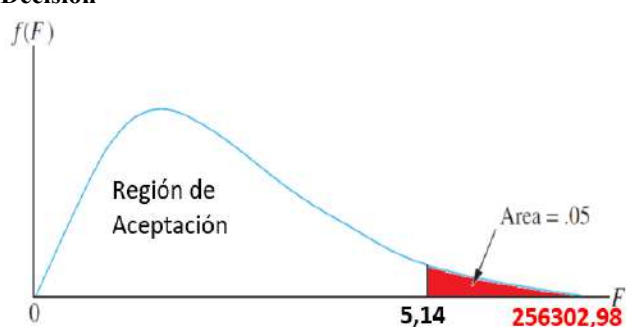


Figura 9 Distribución F. Fuente: [37].

La figura 9, señala que el valor correspondiente a F sobrepasa el valor crítico 5,14 de acuerdo con la zona de aceptación, habiendo diferencia significativa se rechazó la hipótesis nula.

Tabla 9 Prueba Tukey a Pellets según su poder calorífico.

Composiciones A(50-50); B(55-45); C(60-40)	Diferencia muestral	Decisión
$\mu_A - \mu_B$	0,09	Significativa
$\mu_A - \mu_C$	1,73	Significativa
$\mu_B - \mu_C$	1,82	Significativa

Nota: μ = promedio de muestra en valor absoluto. Fuente: [22].

Según la prueba Tukey los valores de la diferencia muestral expresada en valor absoluto son comparados con el de Tukey $\alpha = 0,009$, mostrando diferencia significativa en más de una prueba, lo cual indica que hipótesis nula es rechazada y la hipótesis alterna, aceptada.

Tabla 10 Varianza de resultados de poder calorífico de briqueta.

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Composición 50-50%	3	68,042	22,681	9,33333E-06
Composición 55-45%	3	59,721	19,907	9E-06
Composición 60-40%	3	58,248	19,416	1E-06

Fuente: [22].

Tabla 11 ANOVA.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	18,59235622	2	9,2961781	1442510,3	8,99506E-18	5,14325285
Dentro de los grupos	3,86667E-05	6	6,44E-06			
Total	18,59239489	8				

Fuente: [22].

4.2. Decisión

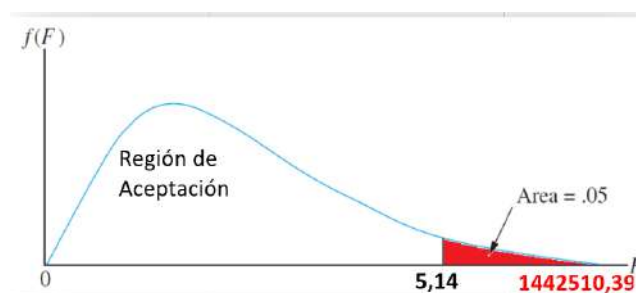


Figura 10 Distribución F. Fuente: [37].

En la Figura 10, se muestra la distribución de los valores F con una probabilidad de significancia de 0,05. Se rechaza la hipótesis nula, ya que el valor de F está fuera de la región de aceptación señalando diferencia significativa entre los valores de poder calorífico de las briquetas.



Tabla 12 Prueba Tukey a Pellets según su poder calorífico.

Composiciones A(50-50); B(55-45); C(60-40)	Diferencia muestral	Decisión
$\mu_A - \mu_B$	2,77	Significativa
$\mu_A - \mu_C$	3,26	Significativa
$\mu_B - \mu_C$	0,49	Significativa

Nota: μ = promedio de muestra en valor absoluto. Fuente: [22].

En la *Tabla 12*, muestran que los valores de diferencia muestral dados en valor absoluto son superiores en comparación al valor de $\alpha = 0,006$, lo que indica que todas las composiciones tienen diferencia significativa aprobando la hipótesis alterna, que especifica que por lo menos un valor debe ser diferente a los demás, al contrario de la hipótesis nula que expresa que la diferencia de los valores de las medias deben ser iguales, es decir no muestran diferencia significativa, para ser aceptada.

5. Conclusiones.

Los residuos de la planta de plátano son una materia prima generada en grandes cantidades en Ecuador. En esta investigación se determinó la eficiencia de los biocombustibles sólidos a partir del análisis de poder calorífico dando como resultado, que tanto pellets y briquetas están dentro de la normativa para biocombustibles sólidos, con un 22,657 MJ/Kg y 22,680 MJ/Kg respectivamente. Por lo que se evidencia que el biocombustible sólido con mayor poder calorífico es la briqueta a base de pseudotallo de plátano, donde se alcanzó un 5% de humedad y un rendimiento de producción del 98,04%. Por lo tanto, los resultados demuestran que el pseudotallo de Plátano es viable y una gran alternativa de biomasa para la producción de briquetas, debido a que desde la biomasa molida se alcanzó $14,44 \frac{MJ}{Kg}$ de poder calorífico, la cual se destaca porque sin la aplicación de una sustancia aglomerante cumple con la Norma NTC 2060 donde establece que para que sea catalogada como briqueta su poder calorífico debe estar entre el rango de 12,5 - $21 \frac{MJ}{Kg}$. Además, con esta investigación se da el inicio para más estudios sobre los residuos de la planta de plátano, en el cual se use el 100% de biomasa sin necesidad de aglomerantes, donde se podría reducir la cantidad de residuos de esta planta, para la generación de energía de forma renovable y con una huella de carbono nula, lo cual contribuye al cuidado del medio ambiente.

6.- Author Contributions (Contributor Roles Taxonomy (CRediT))

1. Conceptualización: Nahir Alondra Pérez
2. Investigación: Nahir Alondra Pérez
3. Metodología: Nahir Alondra Pérez
4. Administración del proyecto: Sandra Peña
5. Recursos: Sandra Peña

6. Supervisión: Sandra Peña
7. Validación: Darla Vaca
8. Visualización: Sandra Peña
9. Redacción - borrador original: Nahir Alondra Pérez y Sandra Peña
10. Redacción - revisión y edición: Sandra Fajardo
11. Reseña: Eddie Zambrano y Pablo Fajardo

7.- Referencias.

- [D. A. Aguilar Romero, «Determinación del potencial energético de la 1 biomasa residual del cultivos de banana en el Cantón Machala, el Oro, 2 Ecuador.», Noviemvbre 2019. [En línea]. Available: 3 <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/18090>.]
- [INEN, ESPAC, «Superficie de bajo labor agropecuario.», 2022. [En 2 línea]. Available: 3 <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrJoiZTEyY2NiZDIYjZlYi00ZGQ1LTlkNGEiNDk1OGVhM2Q1N2VlIiwidCI6ImYxNThhMmU4LWZhZWVtNDQwNi1iMGFiLWY1ZTI1OWJkYkYxMjY9&pageName=ReportSection>.]
- [UPM, «El plátano, más residuos que producto. ¿Una fuente de 3 bioenergía?», 17 Mayo 2016. [En línea]. Available: 4 <https://www.upm.es/UPM/SalaPrensa/Noticias?fmt=detail&prefmt=articulo&id=8b69e368289a4510VgnVCM10000009c7648a>.]
- [C. Jiménez Coello, «Evaluación de polímeros presentes en 4 pseudotallos de Musa acuminata AAA, Musa sapientum ABB y Musa 5 paradisiaca AAB para la elaboración de bioplástico.», 2017. [En 6 línea]. Available: 7 https://ecosur.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1017/1586/1/100000058414_documento.pdf.]
- [R. A. Sanchez Landi, «Evaluación Del Aporte De Residuos De 5 Pseudotallo En El Crecimiento Y Vigor De Plantas De Banano (Musa 6 Aaa).», 2021. [En línea]. Available: 7 <https://cia.uagraria.edu.ec/Archivos/SANCHEZ%20LANDI%20ROS A%20ANGELICA.pdf>.]
- [Y. Vargas-García, J. Pazmiño-Sánchez y J. Dávila-Rincón, «Potencial 6 de biomasa en América del Sur para la producción de bioplásticos. 7 Una Revisión.», 2022.]
- [J. E. Pincay Moran, J. F. Ramírez Salcan, A. F. López Vargas, F. J. 7 Duque-Aldaz, W. Villamagua Castillo y R. Sánchez Casanova, 8 «Evaluation and Proposal for an Environmental Management System 9 in a Mango Plantation.», *INQUIDE*, vol. 7, n° 1, p. 23–34, 2025.]
- [L. E. Velázquez Áraque, J. M. Aguilar Sierra y E. A. Tulcán Álvarez, 8 «Study of the energy potential of pelletized Ecuadorian rice husk for 9 use as fuel.», *INQUIDE*, vol. 2, n° 1, p. 44–51, 2022.]
- [J. Serrano, W. Mejía, J. Ortiz, A. Sánchez y S. Zalamea, 9 «Determinación del Potencial de Generación Eléctrica a Partir de 1 Biomasa en el Ecuador.», *Revista de la Facultad de Ciencias 2 Químicas*, n° 17, 18 Septiembre 2017.]
- [S. E. Fajardo Muñoz y . V. M. Lituma Mandujano, «Pellet processing 1 using the peel of breadfruit (Artocarpus Altilis) to be used as a 2 biofuel.», *INQUIDE*, vol. 2, n° 2, p. 21–33, 2022.]
- [ECORAE;UMDS;OEA;INIAP;GTZ, Compendio de recomendaciones 1 tecnológicas para los principales cultivos de la Amazonía ecuatoriana, 2 Quito, 2001, p. 120.]
- [J. Domingues Lima, N. De Souza Bravo, D. Eduardo Rozane, E. 1 Shigueaki Nomura, S. Modenese Gorla da Silva y E. Nardini Gomes, 2 «Waste management of pseudostem to increase the growth of banana 3 seedlings.», 2020.]
- [D. E. Carchi Maurat, «Aprovechamiento de los Residuos Agrícolas 1 provenientes del cultivo de Banano para obtener Nanocelulosa.», 3 2014. [En línea]. Available: 4 <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/5292/1/tesis.pdf>.]



- [INEC, ESPAC, «Boletín Situacional,» 2021. [En línea]. Available:
1 http://sipa.agricultura.gob.ec/boletines/situacionales/2021/boletin_situ
4 [acional_platano_2021.pdf](http://sipa.agricultura.gob.ec/boletines/situacionales/2021/boletin_situ).
]
- [INEC, ESPAC, «Ficha de Cultivo (Musa AAA),» 2022. [En línea].
1 Available: <http://sipa.agricultura.gob.ec/index.php/platano>.
5
]
- [I. M. Ríos Badrán, J. Santos Cruz y C. Guitiérrez Antonio,
1 «Biocombustibles Sólidos: Una solución al calentamiento global,»
6 *Ciencia*, vol. 68, n° 4, pp. 1-7, Diciembre 2017.
]
- [M. U. Arteaga Peñafiel, M. Briones Córdova y P. Velásquez Pionce,
1 «Extraction and application of essential oils from feijoa as a
7 preservative in the production of fine dough sausages,» *INQUIDE*,
] vol. 3, n° 12, p. 64–74, 2023.
- [M. D. Cortés Sánchez, E. Gata Montero, A. Pipió Ternerero, Á.
1 Rodríguez Rivas y J. Sánchez Santos, «Biocombustibles: Tipos y
8 estrategias de producción,» *MOLEQLA*, n° 35, pp. 20-25, 16 10 2019.
]
- [F. J. Duque-Aldaz, E. R. Haymacaña Moreno, L. A. Zapata Aspiazu y
1 F. Carrasco Choque, «Prediction of moisture content in the cocoa
9 drying process by simple linear regression,» *INQUIDE*, vol. 6, n° 2,
] pp. 20-20, 2024.
- [S. E. Peña Murillo y E. M. Zambrano Nevárez, Biocombustibles
2 Aprovechamiento de la Biomasa, Primera ed., Savez, 2021, p. 183.
0
]
- [A. I. De Lucas Herguedas, Biomasa, Biocombustible y Sostenibilidad,
2 Palencia, 2012, pp. 77-152.
1
]
- [N. A. Pérez Ortiz y D. R. Vaca Choez, «Aprovechamiento del
2 pseudotallo de plátano (*Musa paradisiaca*) como alternativa para,» 09
2 2023. [En línea]. Available:
] <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/70726>.
- [J. M. Aguillar Sierra y E. A. Tulcám Álvarez, Artists, *Estudio del
2 potencial energético de la cáscara de arroz ecuatoriano peltizado
3 para su uso como combustible*. [Art]. Universidad de Guayaquil,
] 2018.
- [European Pellet Council, «Esquema de certificación de calidad para
2 pellet de madera,» Agosto 2015. [En línea]. Available: [https://enplus-](https://enplus-pellets.eu/es/component/attachments/?task=download&id=162:ENplus-Manual-Espaa-vs-3)
4 [pellets.eu/es/component/attachments/?task=download&id=162:ENplus-](https://enplus-pellets.eu/es/component/attachments/?task=download&id=162:ENplus-Manual-Espaa-vs-3)
] [Manual-Espaa-vs-3](https://enplus-pellets.eu/es/component/attachments/?task=download&id=162:ENplus-Manual-Espaa-vs-3).
- [I. Ríos Badrán, I. Luzardo Ocampo, J. Santos Cruz, G. T. Juan y C.
2 Guitiérrez Antonio, «Biocombustibles sólidos: Una alternativa
5 económica y sostenible para la generación de energía eléctrica en
] México,» *Digital Ciencia*, vol. 12, n° 2, pp. 61-66, 12 2019.
- [NTC 2060, «NTC 2060 - Briquetas combustible para uso doméstico,»
2 ICONTEC, 04 Noviembre 1987. [En línea]. Available:
6 [https://tienda.icontec.org/gp-briquetas-combustibles-para-uso-](https://tienda.icontec.org/gp-briquetas-combustibles-para-uso-domestico-ntc2060-1987.html)
] [domestico-ntc2060-1987.html](https://tienda.icontec.org/gp-briquetas-combustibles-para-uso-domestico-ntc2060-1987.html). [Último acceso: 19 12 2024].
- [INTEREMPRESAS, «Briquetar para aprovechar,» 24 10 2011. [En
2 línea]. Available:
7 [https://www.interempresas.net/Mantenimiento/Articulos/57083-](https://www.interempresas.net/Mantenimiento/Articulos/57083-Briquetar-para-aprovechar.html)
] [Briquetar-para-aprovechar.html](https://www.interempresas.net/Mantenimiento/Articulos/57083-Briquetar-para-aprovechar.html).
- [S. Peña, E. Zambrano, D. Bermeo, F. Reyes, C. Forero, F. Velasco y
2 E. Arango, «Evaluation of Sugarcane Cutting Residues for the
8 Production of Solid Biofuel,» *Migration Letters*, vol. 20, n° S5, pp.
] 928-940, 24 08 2023.
- [S. Peña Murillo y J. López Galán, «Desarrollo sostenible y
2 oportunidad de aprendizaje de las biorrefinerías: Una alternativa de la
9 biomasa,» *Revista de Ciencias Sociales*, vol. 26, pp. 401-411, 2020.
]
- [ASTM D-3174, «Standard Test Method for Ash in the Analysis
3 Sample of Coal and Coke from Coal,» 2012.
- 0
]
- [L. V. Bermeo Valencia, «Obtención de biocarbón mediante
3 torrefacción seca a partir de residuos de balsa (*Ochroma*
1 *pyramidale*),» EPN, Quito, 2018.
]
- [ASTM D-3175, «Standard Test Method for Volatile Matter in the
3 Analysis Sample of Coal and Coke,» 2018.
2
]
- [ASTM D-3172, «Standard Practice For Proximate Analysis of Coal
3 and Coke,» 2002.
3
]
- [C. Camacho, «Análisis de varianza,» Universidad de Sevilla, Sevilla,
3 2020.
4
]
- [A. Cajal, «Prueba de Tukey,» Lifeder, 15 12 2022. [En línea].
3 Available: <https://www.lifeder.com/prueba-de-tukey/>. [Último acceso:
5 15 01 2025].
]
- [LAQUINS-ESPOL, «Informe de análisis,» Guayaquil , 2023.
3
6
]
- [E. Camones Ibarra, Dirección, *Cómo realizar el Análisis de Varianza*
3 *ANOVA*. [Película]. 2021.
7
]



Diseño térmico-hidráulico de un intercambiador de calor multi-tubo para el calentamiento de metanol.

Thermo-hydraulic design of a multi-tube heat exchanger for methanol heating.

Amaury Pérez Sánchez ^{1*}; Zamira María Sarduy Rodríguez ²; Arlenis Cristina Alfaro Martínez ³; Elizabeth Ranero González ⁴; Eddy Javier Pérez Sánchez ⁵

Recibido: 15/12/2024 – Aceptado: 15/03/2025 – Publicado: 01/07/2025

Artículos de
Investigación



Artículos de
Revisión



Artículos de
Ensayos



* Autor para correspondencia.



Resumen.

Un tipo de intercambiador de calor que ha ganado adecuada atención debido a su simplicidad, robustez y extensa variedad de aplicaciones es el intercambiador de calor de multi-tubo. En el presente trabajo, un intercambiador de calor de multi-tubo fue diseñado desde el punto de vista térmico-hidráulico, con el fin de calentar una corriente de metanol hasta 60 °C usando agua condensada como agente de transferencia de calor. Para diseñar este equipo, se empleó una metodología de cálculo clásica y bien conocida, donde varios parámetros de diseño importantes fueron calculados tales como el coeficiente global de transferencia de calor (575,17 W/m².K), el área de transferencia de calor requerida (2,025 m²) y la Diferencia de Temperatura Media Logarítmica (38,02 °C). Los valores de caída de presión calculados de las corrientes de metanol y agua fueron 3 257,66 Pa y 752,88 Pa, respectivamente, los cuales están por debajo de los límites máximos fijados por el servicio de intercambio de calor para ambas corrientes. El intercambiador de calor multi-tubos diseñado presentará una longitud total de 5,76 m.

Palabras clave.

Área de intercambio de calor, intercambiador de calor multi-tubo, caída de presión, longitud del tubo

Abstract.

A type of heat exchanger that has gained adequate attention owing to its simplicity, robustness and extensive variety of applications is the multi-tube heat exchanger. In the present work a multi-tube heat exchanger was designed from the thermo-hydraulic point of view, in order to heat a methanol stream to 60 °C using water condensate as the heat transfer agent. To design this equipment, a classical, well known calculation methodology was employed, where several important design parameters were calculated such as the overall heat transfer coefficient (575.17 W/m².K), the required heat exchange area (2.025 m²) and the Log Mean Temperature Difference (38.02 °C). The calculated pressure drop values of the methanol and water streams were 3,257.66 Pa and 752.88 Pa, respectively, which are lower than the maximum limits set by the heat exchange service for both streams. The designed multi-tube heat exchanger will present a total length of 5.76 m.

Keywords.

Heat exchange area, multi-tube heat exchanger, pressure drop, tube length.

1. Introducción

Los intercambiadores de calor son aparatos térmicos diseñados para el intercambio eficiente de calor entre dos fluidos, ya sea que estos estén en contacto directo, mezclados o separados por una pared sólida delgada (no mezclados). Se presentan en una variedad de tamaños, formas y tipos de construcción, dependiendo del propósito industrial. El rendimiento de los intercambiadores de calor puede mejorarse mediante un diseño adecuado y el establecimiento de especificaciones óptimas de operación. Por lo tanto, la mejora continua de los diferentes aspectos del diseño y de las características de rendimiento de los intercambiadores de calor es el objetivo principal tanto de los investigadores como de los fabricantes que trabajan en este campo [1].

El diseño térmico de los intercambiadores de calor depende en gran medida de las propiedades físicas para obtener los coeficientes de transferencia de calor y, por lo tanto, para realizar los cálculos de diseño, como el área de intercambio de calor y los coeficientes globales de transferencia de calor [2].

Entre los intercambiadores de calor tubulares más comunes utilizados hoy en día en muchas industrias se encuentran los intercambiadores de calor multitubulares (MTHE), los cuales comprenden varios tubos de pequeño diámetro alineados en paralelo dentro de una carcasa exterior de mayor diámetro (Figura 1). En los diseños soldados, los tubos interiores y la carcasa están soldados a las placas tubulares [3].

¹ Faculty of Applied Sciences; University of Camagüey; amaury.perez84@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-0819-6760>, Camagüey, Cuba.

² University of Camagüey; Faculty of Applied Sciences; zamira.sarduy@reduc.edu.cu; <https://orcid.org/0000-0003-1428-3809>, Camagüey, Cuba.

³ Center of Genetic Engineering and Biotechnology of Camagüey; arlenis.alfaro@cigb.edu.cu; <https://orcid.org/0000-0003-2975-6867>, Camagüey, Cuba.

⁴ Faculty of Applied Sciences; University of Camagüey; eliza.eddy2202@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-9755-0276>, Camagüey, Cuba.

⁵ Commercial Department; Company of Automotive Services S.A.; eddyjavierpsanchez@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-4481-1262>, Ciego de Ávila, Cuba.



Fig. 1. Vista general de un intercambiador de calor multitubular.

Fuente: [3].

Apropiados para calefacción, enfriamiento, esterilización y tratamiento térmico, los intercambiadores de calor multitubulares (MTHE) pueden procesar una amplia variedad de líquidos (lácteos, jugos, salsas, bebidas, alimentos procesados) desde bajas hasta viscosidades medias/altas, dependiendo del propósito. También pueden ser utilizados para productos con partículas cuando están equipados con una placa tubular cónica [3].

Debido a su ensamblaje con configuraciones distintivas de tubos interiores agrupados dentro de una carcasa exterior, los MTHE generan una superficie significativa de intercambio de calor en un espacio volumétrico razonablemente pequeño. Esta configuración hace que este tipo de intercambiador de calor sea valioso para manejar una amplia gama de caudales. Entre las principales características que presentan este tipo de intercambiadores de calor se encuentran [3]:

1. El uso de fuelles de expansión térmica para absorber diferencias de dilatación.
2. Placa tubular cónica para líquidos que contienen partículas.
3. Los deflectores se instalan comúnmente para proporcionar resistencia mecánica y mejorar la transferencia de calor en el lado de la carcasa.
4. El lado del producto puede ser inspeccionado eliminando las curvas entre unidades. Todos los tubos interiores son observables.
5. Bajo costo, mantenimiento sencillo con el único requisito de reemplazar periódicamente las juntas en las conexiones.

Según [4], estas unidades son normalmente construidas por empresas especializadas, y existen varios sistemas de cierre protegidos por patentes. Pueden ser una solución económica en casos donde los caudales son relativamente pequeños y se requiere aplicar una configuración a contracorriente.

Están limitados a unos pocos tubos interiores, ya que para tamaños mayores este tipo de ensamblaje se vuelve complicado. No son una solución competitiva frente a los intercambiadores de calor de carcasa y tubos (STHE), aunque son más económicos que estos [5], y están

restringidos a aplicaciones donde el área de transferencia de calor requerida sea menor a 10 o 15 m² [4].

Un análisis térmico eficiente y preciso de los MTHE proporciona la base para un diseño exitoso [6]. La atención principal en el diseño de los MTHE es la eficiencia en la disipación de calor mediante conducción sólida y convección forzada. Un buen MTHE debe contar con una configuración multitubular óptima para disipar la mayor cantidad de calor posible [6].

Existen pocos estudios reportados en la literatura publicada abiertamente donde se diseñe o dimensione un intercambiador de calor multitubular. En este sentido, en [7] se propone un intercambiador de calor multitubular coaxial (CMTHE) e integrado con un ciclo Orgánico de Rankine (ORC) geotérmico de 50 kW, con el objetivo de realizar dos pruebas de campo para examinar la respuesta del sistema ORC ante cambios aplicados al CMTHE. En este estudio, el fluido de trabajo en el lado de los tubos del intercambiador es agua pura con un caudal de 13 toneladas por hora, mientras que en el lado de la carcasa el fluido de trabajo es agua geotérmica caliente (□ 120 °C). El CMTHE utilizado en este trabajo tiene una longitud total de 11 m, un área efectiva de transferencia de calor de 18.6 m², y los diámetros interno y externo de los tubos son de 10.7 mm y 12.7 mm, respectivamente.

Otros autores [1] investigaron la influencia de varios parámetros operativos sobre el rendimiento de intercambiadores de calor de tubos concéntricos con aletas y de tipo hairpin multitubular sin aletas. Se desarrolló un programa informático para realizar cálculos termo-hidráulicos utilizando MATLAB. Luego, el código desarrollado en MATLAB fue verificado en cuanto a confiabilidad y precisión comparándolo con algunos diseños existentes y aceptables de intercambiadores de calor de tubo único con aletas y hairpin multitubulares sin aletas. El intercambiador de calor multitubular sin aletas de flujo a contracorriente evaluado en este estudio utilizó agua dulce en el lado de la carcasa y agua aceitosa en el lado de los tubos, con un caudal másico de 6,622 kg/h para ambas corrientes. Los diámetros interno y externo de los tubos fueron de 17.95 mm y 22.21 mm, respectivamente; el número de tubos internos fue 7; las temperaturas de entrada del fluido del lado de los tubos (agua aceitosa) y del lado de la carcasa (agua dulce) fueron de 247 °C y 80 °C, respectivamente; y la longitud total del intercambiador de calor fue de 60.96 m. Finalmente, las pérdidas de presión permisibles para ambas corrientes de fluido fueron de 137,895.15 Pa, mientras que la pérdida de presión real del agua aceitosa en el lado de los tubos fue de 22,063.22 Pa.

Asimismo, en [6] se propuso un modelo matemático general para el diseño óptimo de eficiencia de transferencia de calor de intercambiadores de calor compactos multitubulares utilizando conceptos de optimización topológica. Para los objetivos de optimización, la configuración multitubular se

transformó en una distribución equivalente de material celular dentro de una sección transversal dada, la cual fue ejemplificada mediante dos variables de diseño: la densidad celular relativa local y el tamaño de celda.

Además, en [8] se llevó a cabo una investigación numérica sobre el rendimiento de un intercambiador de calor multitubular basado en material de cambio de fase, incorporando dos nuevas configuraciones de aletas. con el fin de mejorar la transferencia de calor. Finalmente, en una investigación experimental y numérica integral, [9] estudió intercambiadores de calor de doble tubo y multitubulares con superficies lisas y con aletas rectangulares, con el objetivo de presentar las condiciones operativas más óptimas.

Cierta planta química ubicada en Cuba necesita calentar una corriente de metanol líquido hasta 60 °C utilizando agua caliente (condensado), y para ello se propuso un intercambiador de calor multitubular, debido a que los caudales de los fluidos son relativamente pequeños, existe suficiente disponibilidad de espacio y hay limitaciones presupuestarias. En este contexto, en el presente trabajo se diseña un MTHE aplicando la metodología reportada en [10], donde se determinan varios parámetros importantes como el coeficiente global de transferencia de calor, el área requerida de intercambio térmico, la longitud del intercambiador de calor y la caída de presión de ambos fluidos.

2. Materiales y métodos

2.1. Planteamiento del problema

Se requiere precalentar 2,000 kg/h de una corriente de metanol líquido desde 30 °C hasta 60 °C utilizando 3,000 kg/h de agua caliente (condensado) disponible a 90 °C. Para ello, se propuso un intercambiador de calor multitubular con un diámetro interno de la carcasa de 72.1 mm, equipado con siete tubos interiores con diámetros interno y externo de 14 mm y 16 mm, respectivamente. Las caídas de presión para las corrientes de metanol y agua no deben superar los 3,500 y 1,000 Pa, respectivamente. El material de los tubos es acero al carbono; los fluidos fluirán en un arreglo a contracorriente dentro del intercambiador de calor, mientras que los factores de ensuciamiento para el metanol y el agua son 0.000352 y 0.000088 K·m²/W, respectivamente [11].

Según las recomendaciones reportadas por [12], el fluido frío (metanol) se ubicará en el lado de los tubos, mientras que el fluido caliente (agua) se ubicará en el lado de la carcasa. Los diámetros internos de las boquillas en el lado de los tubos y en el lado de la carcasa son de 32 mm y 50 mm, respectivamente, y el espesor de pared de los tubos es de 2 mm. Es necesario conocer la longitud de los tubos requerida por este intercambiador multitubular, así como las caídas de presión de ambas corrientes, para la transferencia de calor solicitada. el servicio de transferencia de calor. Para

el diseño del MTHE, debe emplearse la metodología de cálculo propuesta por [10].

2.2. Cálculo de la longitud de los tubos

Paso 1. Definición de los datos iniciales disponibles:

- Caudal másico de metanol (m_c).
- Caudal másico de agua (m_h).
- Temperatura de entrada del metanol (t_1).
- Temperatura de salida del metanol (t_2).
- Temperatura de entrada del agua (T_1).
- Diámetro interno de la carcasa (D_i).
- Diámetro interno de los tubos (d_i).
- Diámetro externo de los tubos (d_e).
- Diámetro interno de la boquilla del lado de los tubos (d_{N_i}).
- Diámetro interno de la boquilla del lado de la carcasa (d_{N_o}).
- Conductividad térmica del material de los tubos (acero al carbono) (k_i).
- Espesor de pared de los tubos (e_i).
- Factor de ensuciamiento del metanol (R_c).
- Factor de ensuciamiento del agua (R_h).
- Número de tubos interiores (n).
- Caída de presión máxima permitida para el metanol [$\Delta P_c(a)$].
- Caída de presión máxima permitida para el agua [$\Delta P_h(a)$].

Paso 2. Temperatura promedio del metanol ($\bar{t}$):

$$\bar{t} = \frac{t_1 + t_2}{2} \quad (1)$$

Paso 3. Parámetros físicos del metanol a la temperatura promedio determinada en el paso 1:

Los siguientes parámetros deben definirse para el metanol a la temperatura promedio:

- Densidad (ρ_c) [kg/m³].
- Viscosidad (μ_c) [Pa·s].
- Capacidad calorífica (C_{p_c}) [J/kg·K].
- Conductividad térmica (k_c) [W/m·K].

Paso 4. Carga térmica (Q):

$$Q = \frac{m_c}{3,600} \cdot C_{p_c} \cdot (t_2 - t_1) \quad (2)$$

Paso 5. Capacidad calorífica del agua (C_{p_h}) a la temperatura de entrada del agua (T_1).

Paso 6. Temperatura de salida del agua (T_2):

$$T_2 = T_1 - \frac{Q}{\frac{m_h}{3,600} \cdot C_{p_h}} \quad (3)$$

Paso 7. Temperatura promedio del agua ($\bar{T}$):

$$\bar{T} = \frac{T_1 + T_2}{2} \quad (4)$$

Paso 8. Parámetros físicos del agua a la temperatura promedio determinada en el paso 6:

Los siguientes parámetros deben definirse para el agua a su temperatura promedio:

- Densidad (ρ_h) [kg/m³].
- Viscosidad (μ_h) [Pa·s].
- Conductividad térmica (k_h) [W/m·K].

Paso 9. Área de la sección transversal del tubo (a_t):

$$a_t = n \cdot \frac{\pi \cdot d_i^2}{4} \quad (5)$$

Paso 10. Velocidad del metanol en el lado de los tubos (v_c):

$$v_c = \frac{m_c}{\rho_c \cdot a_t} \quad (6)$$

Paso 11. Número de Reynolds del metanol (Re_c):

$$Re_c = \frac{d_i \cdot v_c \cdot \rho_c}{\mu_c} \quad (7)$$

Paso 12. Número de Prandtl del metanol (Pr_c):

$$Pr_c = \frac{Cp_c \cdot \mu_c}{k_c} \quad (8)$$

Paso 13. Número de Nusselt del metanol (Nu_c):

Como indica [10], el número de Nusselt depende del valor del número de Reynolds del fluido dentro del intercambiador de calor. En consecuencia:

Región laminar ($Re_c \leq 2,300$):

$$Nu_c = 1.86 \cdot Re_c^{0.33} \cdot Pr_c^{0.33} \cdot \left(\frac{d_i}{L}\right)^{0.33} \quad (9)$$

- Región Intermedia ($2,300 < Re_c < 8,000$):

$$Nu_c = (0.037 \cdot Re_c^{0.75} - 6.66) \cdot Pr_c^{0.42} \quad (10)$$

- Región Turbulenta ($Re_c \geq 8,000$):

$$Nu_c = 0.023 \cdot Re_c^{0.8} \cdot Pr_c^{0.33} \quad (11)$$

Paso 14. Coeficiente de transferencia de calor por convección para el metanol (h_c):

$$h_c = \frac{Nu_c \cdot k_c}{d_i} \quad (12)$$

Paso 15. Coeficiente de transferencia de calor por convección para el metanol basado en el área de la superficie exterior del tubo (h_{co}):

$$h_{co} = h_c \cdot \frac{d_i}{d_e} \quad (13)$$

Paso 16. Sección transversal del flujo en la carcasa ():

$$a_{shell} = \frac{\pi}{4} \cdot (D_i^2 - n \cdot d_e^2) \quad (14)$$

Paso 17. Velocidad del agua en la carcasa ():

$$v_h = \frac{m_h}{\rho_h \cdot a_{shell}} \quad (15)$$

Paso 18. Diámetro hidráulico para el intercambio de calor ():

$$d_h = \frac{D_i^2 - n \cdot d_e^2}{n \cdot d_e} \quad (16)$$

Paso 19. Número de Reynolds del agua (Re_h):

$$Re_h = \frac{d_h \cdot v_h \cdot \rho_h}{\mu_h} \quad (17)$$

Paso 20. Número de Prandtl del agua (Pr_h):

$$Pr_h = \frac{Cp_h \cdot \mu_h}{k_h} \quad (18)$$

- Paso 21. Número de Nusselt del agua (Nu_h):

- Región Laminar ($Re_h \leq 2,300$):

$$Nu_h = 1.86 \cdot Re_h^{0.33} \cdot Pr_h^{0.33} \cdot \left(\frac{d_h}{L}\right)^{0.33} \quad (19)$$

- Región Intermedia ($2,300 < Re_h < 8,000$):

$$Nu_h = (0.037 \cdot Re_h^{0.75} - 6.66) \cdot Pr_h^{0.42} \quad (20)$$

- Región Turbulenta ($Re_h \geq 8,000$):

$$Nu_h = 0.023 \cdot Re_h^{0.8} \cdot Pr_h^{0.33} \quad (21)$$

Paso 22. Coeficiente de transferencia de calor por convección para el agua (h_h):

$$h_h = \frac{Nu_h \cdot k_h}{d_h} \quad (22)$$

Paso 23. Coeficiente global de transferencia de calor (U):

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_{co}} + \frac{1}{h_h} + \frac{e_t}{k_t} + R_c + R_h} \quad (23)$$

Paso 24. Diferencia de temperatura media logarítmica (LMTD):

- Para una configuración de contracorriente:

$$LMTD = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln \frac{(T_1 - t_2)}{(T_2 - t_1)}} \quad (24)$$

Paso 25. Área requerida de intercambio de calor (A_{req}):

$$A_{req} = \frac{Q}{U \cdot LMTD} \quad (25)$$

Paso 26. Longitud del intercambiador de calor ():

$$L = \frac{A_{req}}{\pi \cdot n \cdot d_e} \quad (26)$$

2.3. Cálculo de las caídas de presión.

Paso 27. Área de la sección transversal de la boquilla del lado de los tubos ($a_{N(t)}$):

$$a_{N(t)} = \frac{\pi \cdot d_N^2}{4} \quad (27)$$

Paso 28. Velocidad de flujo del metanol en la boquilla del lado de los tubos ($v_{N(c)}$):

$$v_{N(c)} = \frac{m_c}{\rho_c \cdot a_{N(c)}} \quad (28)$$

Paso 29. Caída de presión en la boquilla del metanol en el lado de los tubos ($\Delta p_{N(c)}$):

$$\Delta p_{N(c)} = 1.5 \cdot \frac{v_{N(c)}^2 \cdot \rho_c}{2} \quad (29)$$

Paso 30. Factor de fricción del metanol (f_c):

$$f_c = \frac{0.275}{Re_c^{0.2}} \quad (30)$$

Paso 31. Caída de presión por fricción del metanol en el lado de los tubos ($\Delta p_{f(c)}$):

$$\Delta p_{f(c)} = f_c \cdot \frac{L}{d_i} \cdot \frac{v_c^2 \cdot \rho_c}{2} \quad (31)$$

Paso 32. Caída de presión total del metanol en el lado de los tubos (Δp_c):

$$\Delta p_c = \Delta p_{N(c)} + \Delta p_{f(c)} \quad (32)$$

Paso 33. Área de la sección transversal de la boquilla del lado de la carcasa ($a_{N(s)}$):

$$a_{N(s)} = \frac{\pi \cdot D_N^2}{4} \quad (33)$$

Paso 34. Velocidad de flujo del agua en la boquilla del lado de la carcasa ($v_{N(h)}$):

$$v_{N(h)} = \frac{m_h}{\rho_h \cdot a_{N(s)}} \quad (34)$$

Paso 35. Caída de presión en la boquilla del agua en el lado de la carcasa ($\Delta p_{N(h)}$):

$$\Delta p_{N(h)} = 1.5 \cdot \frac{v_{N(h)}^2 \cdot \rho_h}{2} \quad (35)$$

Paso 36. Diámetro hidráulico para la caída de presión (d'_h):

$$d'_h = \frac{D_i^2 - n \cdot d_e^2}{D_i + n \cdot d_e} \quad (36)$$

Paso 37. Número de Reynolds del agua para la caída de presión (Re'_h):

$$Re'_h = \frac{d'_h \cdot v_h \cdot \rho_h}{\mu_h} \quad (37)$$

Paso 38. Factor de fricción del agua (f_h):

$$f_h = \frac{0.275}{Re_h^{0.2}} \quad (38)$$

Paso 39. Caída de presión por fricción del agua en el lado de la carcasa ($\Delta p_{f(h)}$):

$$\Delta p_{f(h)} = f_h \cdot \frac{L}{d'_h} \cdot \frac{v_h^2 \cdot \rho_h}{2} \quad (39)$$

Paso 40. Caída de presión total del agua en el lado de la carcasa (Δp_h):

$$\Delta p_h = \Delta p_{N(h)} + \Delta p_{f(h)} \quad (40)$$

3. Resultados

Los pasos seguidos para determinar la longitud requerida de los tubos y la caída de presión de ambos fluidos, entre otros parámetros importantes, se presentan a continuación, con el

fin de diseñar el intercambiador de calor multitubo desde el punto de vista termo-hidráulico.

3.1. Longitud del tubo

Paso 1. Definición de los datos iniciales disponibles:

- Caudal másico de metanol (m_c): 2,000 kg/h
- Caudal másico de agua (m_h): 3,000 kg/h
- Temperatura de entrada del metanol (t_1): 30 °C
- Temperatura de salida del metanol (t_2): 60 °C
- Temperatura de entrada del agua (T_1): 90 °C
- Diámetro interno de la carcasa (D_i): 0.0721 m
- Diámetro interno de los tubos (d_i): 0.014 m
- Diámetro externo de los tubos (d_e): 0.016 m
- Diámetro interno de la boquilla del lado de los tubos (d_N): 0.032 m
- Diámetro interno de la boquilla del lado de la carcasa (D_N): 0.050 m
- Conductividad térmica del acero al carbono (k_t): 43 W/m·K [11]
- Espesor de pared del tubo (e_t): 0.002 m
- Factor de incrustación del metanol (R_c): 0.000352 K·m²/W [11]
- Factor de incrustación del agua (R_h): 0.000088 K·m²/W [11]
- Número de tubos (n): 7
- Caída de presión máxima permitida para el metanol ($\Delta P_{c(a)}$): 3,500 Pa
- Caída de presión máxima permitida para el agua ($\Delta P_{h(a)}$): 1,000 Pa

Paso 2. Temperatura promedio del metanol ($\bar{t}$):

$$\bar{t} = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{30 + 60}{2} = 45 \text{ °C} \quad (1)$$

Paso 3. Parámetros físicos del metanol a la temperatura promedio determinada en el paso 1:

Según [13], el metanol presenta los siguientes valores para los parámetros físicos solicitados:

Densidad (ρ_c) = 770.12 kg/m³

Viscosidad (μ_c) = 0.000423 Pa·s

Capacidad calorífica (Cp_c) = 2,657.53 J/kg·K

Conductividad térmica (k_c) = 0.1943 W/m·K

Paso 4. Carga térmica (Q):

$$Q = \frac{m_c}{3,600} \cdot Cp_c \cdot (t_2 - t_1) \quad (2)$$

$$Q = \frac{2,000}{3,600} \cdot 2,657.53 \cdot (60 - 30)$$

$$Q = 44,292.17 \text{ W}$$

Paso 5. Capacidad calorífica del agua ($[Cp]_h$) a la temperatura de entrada del agua (T_1).



Según lo reportado por [13], la capacidad calorífica del agua a 90 °C es 4,205.21 J/kg·K.

Paso 6. Temperatura de salida del agua (T_2):

$$T_2 = T_1 - \frac{Q}{3,600 \cdot m_h \cdot C_{p_h}} \quad (3)$$

$$T_2 = 90 - \frac{44,292.17}{3,600 \cdot 4,205.21}$$

$$T_2 = 77.36 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Paso 7. Temperatura promedio del agua ($\bar{T}$):

$$\bar{T} = \frac{T_1 + T_2}{2} = \frac{90 + 77.36}{2} = 83.68 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (4)$$

Paso 8. Parámetros físicos del agua a la temperatura promedio determinada en el paso 6:

De acuerdo con [14], el agua presenta los valores de los parámetros físicos que se muestran a continuación a la temperatura promedio de 83.68 °C.

Densidad (ρ_h) = 969.46 kg/m³.

Viscosidad (μ_h) = 0.000339 Pa.s.

Conductividad térmica (k_h) = 0.6721 W/m·K.

La Tabla 1 presenta los valores de los parámetros calculados en los pasos 9-26.

Tabla 1. Resultados de los parámetros calculados en los pasos 9-26.

Paso	Parámetro	Símbolo	Valor	Unidades
9	Área de la sección transversal del tubo	a_t	0.001077	m ²
10	Velocidad del metanol en el lado de los tubos	v_c	0.670	m/s
11	Número de Reynolds del metanol ¹	Re_c	17,077.36	-
12	Número de Prandtl del metanol	Pr_c	5.78	-
13	Número de Nusselt del metanol ²	Nu_c	99.56	-
14	Coefficiente de transferencia de calor convectivo para el metanol	h_c	1,381.75	W/m ² .K

15	Coefficiente de transferencia de calor convectivo para el metanol basado en el área externa del tubo	h_{co}	1,209.03	W/m ² .K
16	Sección transversal del flujo en la carcasa	a_{shell}	0.00267	m ²
17	Velocidad del agua en la carcasa	v_h	0.322	m/s
18	Diámetro hidráulico para el intercambio de calor	d_h	0.0304	m
19	Número de Reynolds del agua ³	Re_h	27,993.66	-
20	Número de Prandtl del agua	Pr_h	2.12	-
21	Número de Nusselt del agua ⁴	Nu_h	106.43	-
22	Coefficiente de transferencia de calor convectivo para el agua	h_h	2,353.01	W/m ² .K
23	Coefficiente global de transferencia de calor	U	575.17	W/m ² .K
24	Diferencia de temperatura media logarítmica	$LMTD$	38.02	°C
25	Área requerida de intercambio de calor	A_{req}	2.025	m ²
26	Longitud del intercambiador de calor	L	5.76	m

Dado que $[Re]_c > 8,000$, el metanol fluirá en régimen turbulento dentro del intercambiador de calor.

Dado que $[Re]_c > 8,000$, la ecuación empleada para determinar el número de Nusselt del metanol fue la número (11).

Dado que $[Re]_h > 8,000$, el agua fluirá en régimen turbulento dentro del intercambiador de calor.

Dado que $[Re]_h > 8,000$, se empleó la ecuación (21) para determinar el número de Nusselt del agua.

Fuente: Elaboración propia

3.2. Caídas de presión.

La Tabla 2 muestra los resultados de los parámetros calculados en los pasos 27-40.

Tabla 2. Resultados de los parámetros calculados en los pasos 27-40.

Paso	Parámetro	Símbolo	Valor	Unidades
27	Área de la sección transversal de la boquilla del lado de tubos	$a_{N(t)}$	0.00080	m ²
28	Velocidad de flujo de metanol en la boquilla del lado de tubos	$v_{N(c)}$	0.902	m/s
29	Caída de presión en la boquilla del metanol en el lado de tubos	$\Delta p_{N(c)}$	469.93	Pa
30	Factor de fricción del metanol	f_c	0.0392	-
31	Caída de presión por fricción del metanol en el lado de tubos	$\Delta p_{f(c)}$	2,787.73	Pa
32	Caída de presión total del metanol en el lado de tubos	Δp_c	3,257.66	Pa
33	Área de la sección transversal de la boquilla del lado de carcasa	$a_{N(s)}$	0.00196	m ²
34	Velocidad de flujo de agua en la boquilla del lado de carcasa	$v_{N(h)}$	0.438	m/s
35	Caída de presión en la boquilla del agua en el lado de carcasa	$\Delta p_{N(h)}$	139.49	Pa
36	Diámetro hidráulico para la caída de presión	d'_h	0.0185	m
37	Número de Reynolds del agua para la caída de presión	Re'_h	17,035.61	-
38	Factor de fricción del agua	f_h	0.0392	-
39	Caída de presión por fricción del agua en el lado de carcasa	$\Delta p_{f(h)}$	613.39	Pa
40	Caída de presión total del agua en el lado de carcasa	Δp_h	752.88	Pa

Fuente: Elaboración propia

4. Discusión.

Según los resultados mostrados en la Tabla 1, la velocidad del metanol en el lado de los tubos fue de 0.670 m/s, lo cual es 2.08 veces mayor que la velocidad del agua en la carcasa;

esto se debe al menor valor que presentan la densidad del metanol (770.12 kg/m³) y el área de la sección transversal del tubo (0.001077 m²) con respecto a la densidad del agua (969.46 kg/m³) y el área de la sección transversal del flujo en la carcasa (0.00267 m²).

El número de Reynolds del agua (27,993.66) es 1.64 veces mayor que el número de Reynolds del metanol (17,077.36), lo que se debe al mayor valor que presentan la densidad del agua (969.46 kg/m³) y el diámetro hidráulico para el intercambio de calor (0.0304), y al menor valor de la viscosidad del agua (0.000339 Pa.s) con respecto a los valores de la densidad del metanol (770.12 kg/m³), el diámetro interno del tubo (0.014 m) y la viscosidad del metanol (0.000423 Pa.s). Cabe destacar que ambos fluidos fluyen en régimen turbulento, ya que ambos números de Reynolds están por encima de 8,000 [10].

El coeficiente convectivo de transferencia de calor del agua (2,353.01 W/m².K) es 1.70 veces mayor que el coeficiente convectivo de transferencia de calor para el metanol (1,381.75 W/m².K), principalmente porque el número de Nusselt (106.43) y la conductividad térmica (0.6721 W/m.K) del agua son mayores que el número de Nusselt (99.56) y la conductividad térmica (0.1943 W/m.K) del metanol.

La carga térmica fue de 44,292.17 W, mientras que la temperatura de salida calculada del agua fue de 77.36 °C. El valor del coeficiente global de transferencia de calor fue de 575.17 W/m².K, lo cual concuerda con los valores reportados por [4] y [11], mientras que la diferencia de temperatura media logarítmica fue de 38.02 °C. El intercambiador de calor multitubo diseñado necesitará un área de intercambio térmico de 2.025 m², lo que corresponde a los valores reportados por [4] para este tipo de intercambiadores, requiriendo así una longitud total de 5.76 m, que puede considerarse adecuada [3]. En [10], se diseñó un intercambiador multitubo y los resultados del área de intercambio térmico y la longitud total del tubo fueron 1.01 m² y 2.90 m, respectivamente.

La caída de presión en la boquilla del metanol en el lado de tubos (469.93 Pa) es 3.37 veces mayor que la caída de presión en la boquilla del agua en el lado de la carcasa (139.49 Pa), lo cual se debe al hecho de que la velocidad de flujo del metanol en la boquilla del lado de tubos (0.902 m/s) es casi el doble que la velocidad de flujo del agua en la boquilla del lado de carcasa (0.438 m/s). Esto ocurre porque el diámetro interno de la boquilla del lado de tubos (0.032 m) es menor que el diámetro interno de la boquilla del lado de carcasa (0.050 m), resultando en un área de sección transversal menor para la boquilla del lado de tubos (0.00080 m²) con respecto al área de la boquilla del lado de carcasa (0.00196 m²), lo que influye en el mayor valor obtenido para la velocidad de flujo del metanol en la boquilla del lado de tubos en comparación con la velocidad



de flujo del agua en la boquilla del lado de carcasa, boquilla del lado de la carcasa. Por otro lado, la caída de presión por fricción del metanol en el lado de los tubos (2,787.73 Pa) es 4.54 veces mayor que la caída de presión por fricción del agua en el lado de la carcasa (613.39 Pa), lo cual se debe a que la velocidad del metanol en el lado de los tubos (0.670 m/s) es mayor y el diámetro interno de los tubos (0.014 m) es menor que la velocidad del agua en la carcasa (0.322 m/s) y el diámetro hidráulico para la caída de presión (0.0185 m), respectivamente. Cabe mencionar que el valor del factor de fricción del metanol es igual al valor del factor de fricción del agua, es decir, ambos tienen un valor de 0.0392, lo cual es un resultado interesante.

La discusión anterior explica por qué la caída total de presión del metanol en el lado de los tubos (3,257.66 Pa) es 4.32 veces mayor que la caída total de presión del agua en el lado de la carcasa (752.88 Pa), ya que tanto la caída de presión en la boquilla del metanol en el lado de los tubos como la caída de presión por fricción del metanol en el lado de los tubos son mayores que la caída de presión en la boquilla del agua en el lado de la carcasa y la caída de presión por fricción del agua en el lado de la carcasa, respectivamente. Este resultado concuerda con lo reportado por [10].

La Figura 2 muestra el esquema del intercambiador multitubo diseñado (MTHE), con sus principales parámetros de diseño y la información numérica de ambos flujos.

Fig. 2. Esquema del MTHE diseñado.

Fuente: Elaboración propia.

5. Conclusiones.

Se diseñó un intercambiador de calor multitubo desde el punto de vista termo-hidráulico, con el fin de calentar un flujo de metanol a 60 °C utilizando condensado de agua a 90 °C. La metodología de cálculo empleada en este estudio para diseñar el MTHE fue la reportada por [10]. Se determinaron varios parámetros importantes de diseño, tales como la diferencia de temperatura media logarítmica (38.02 °C), el coeficiente global de transferencia de calor (575.17 W/m².K), el área requerida para el intercambio térmico (2.025 m²), así como los números de Reynolds, Prandtl y...

Números de Nusselt y coeficientes de transferencia de calor convectiva para ambos fluidos. También se calcularon las caídas de presión de ambos flujos, cuyos valores están por debajo de los límites máximos establecidos por el servicio de intercambio térmico. El intercambiador de calor multitubo diseñado tendrá una longitud total de 5.76 m.

6.- Author Contributions.

1. Conceptualization: Amaury Pérez Sánchez.
2. Data curation: Zamira María Sarduy Rodríguez.

3. Formal Analysis: Amaury Pérez Sánchez, Arlenis Cristina Alfaro Martínez.
4. Acquisition of funds: Not applicable.
5. Research: Amaury Pérez Sánchez, Arlenis Cristina Alfaro Martínez, Zamira María Sarduy Rodríguez.
6. Methodology: Amaury Pérez Sánchez, Elizabeth Ranero González.
7. Project management: Not applicable.
8. Resources: Not applicable.
9. Software: Not applicable.
10. Supervision: Amaury Pérez Sánchez.
11. Validation: Amaury Pérez Sánchez, Eddy Javier Pérez Sánchez.
12. Visualization: Not applicable.
13. Writing – original draft: Elizabeth Ranero González, Eddy Javier Pérez Sánchez.
14. Writing - revision y editing: Amaury Pérez Sánchez.

7.- References.

- [1] Ballil and S. Jolgam, "Analysis and Performance Evaluation of Counter Flow Hairpin Heat Exchangers," *American Academic Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences*, vol. 85, no. 1, pp. 170-188, 2022. https://asrjetsjournal.org/index.php/American_Scientific_Journal/article/view/7324
- [2] D. D. Clarke, C. R. Vasquez, W. B. Whiting, and M. Greiner, "Sensitivity and uncertainty analysis of heat-exchanger designs to physical properties estimation," *Applied Thermal Engineering*, vol. 21, pp. 993-1017, 2001. [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(00\)00101-0](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(00)00101-0)
- [3] SPX FLOW, "ParaTube MultiTube Heat Exchangers - Welded Design for Sanitary Applications," ed. North Carolina, USA: SPX FLOW, Inc., 2019. <https://www.spxflow.com/assets/original/apv-hc-multitube-flr-us.pdf>
- [4] E. Cao, *Heat transfer in process engineering*. New York, USA: The McGraw-Hill Companies, Inc., 2010. <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780071624084>
- [5] R. Sinnott and G. Towler, *Chemical Engineering Design*, 6th ed. Oxford, United Kingdom: Butterworth-Heinemann, 2020. <https://doi.org/10.1016/C2017-0-01555-0>
- [6] Wang, G. D. Cheng, and L. Jiang, "Design of multi-tubular heat exchangers for optimum efficiency of heat dissipation," *Engineering Optimization*, vol. 40, no. 8, pp. 767-788, 2008. <http://dx.doi.org/10.1080/03052150802054027>
- [7] J. C. Hsieh, Y. R. Lee, T. R. Guo, L. W. Liu, P. Y. Cheng, and C. C. Wang, "A Co-axial multi-tube heat exchanger applicable for a Geothermal ORC power plant," *Energy Procedia*, vol. 61, pp. 874-877, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.11.985>
- [8] Dandotiya and N. D. Banker, "Numerical investigation of heat transfer enhancement in a multitube thermal energy storage heat exchanger using fins," *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, vol. 72, no. 5, pp. 389-400, 2017. <http://dx.doi.org/10.1080/10407782.2017.1376976>
- [9] J. Taborek, "Double-Pipe and Multitube Heat Exchangers with Plain and Longitudinal Finned Tubes," *Heat Transfer Engineering*, vol. 18, no. 2, pp. 34-45, 1997. <http://dx.doi.org/10.1080/01457639708939894>
- [10] M. Nitsche and R. O. Gbadosi, *Heat Exchanger Design Guide*. Oxford, UK: Butterworth Heinemann, 2016. <https://doi.org/10.1016/C2014-0-04971-4>
- [11] S. Kakaç, H. Liu, and A. Pramuanjaroenkij, *Heat Exchangers. Selection, Rating and Thermal Design*, 3rd ed. Boca Raton, USA: CRC Press, 2012. <https://doi.org/10.1201/b11784>



- [12] R. K. Sinnott, *Chemical Engineering Design*, 4th ed. Oxford, UK: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005.
- [13] W. Green and M. Z. Southard, *Perry's Chemical Engineers' Handbook*, 9th ed. New York, USA: McGraw-Hill Education, 2019.
- [14] ChemicalLogic, "Thermodynamic and Transport Properties of Water and Steam," Version 2.0 Burlington, USA: ChemicalLogic Corporation, 2003.

Nomenclature

$a_{N(s)}$	Cross section area of the shell-side nozzle	m ²
$a_{N(t)}$	Cross section area of the tube-side nozzle	m ²
a_{shell}	Flow cross-section in the shell	m ²
a_t	Cross section area of tube	m ²
A_{req}	Required heat exchange area	m ²
C_p	Heat capacity	J/kg.K
d_e	External diameter of tubes	m
d_h	Hydraulic diameter for heat exchange	m
d'_h	Hydraulic diameter for the pressure drop	m
d_i	Internal diameter of tubes	m
d_N	Internal diameter of the tube side nozzle	m
D_i	Internal diameter of shell	m
D_N	External diameter of the shell side nozzle	m
e_t	Tube wall thickness	m
f	Friction factor	-
h	Convective heat transfer coefficient	W/m ² .K
h_o	Convective heat transfer coefficient based on the tube outer surface area	W/m ² .K
k	Thermal conductivity	W/m.K
k_t	Thermal conductivity of the tube material (carbon steel)	W/m.K
L	Length of the heat exchanger	
$LMTD$	Log Mean Temperature Difference	°C
m	Mass flowrate	kg/h
n	Number of tubes	-
Nu	Nusselt number	-
Pr	Prandtl number	-
Δp	Total pressure drop	Pa
$\Delta P_{(a)}$	Maximum allowable pressure drop	Pa
$\Delta p_{f(c)}$	Frictional pressure drop of cold fluid in the tube side	Pa
$\Delta p_{f(h)}$	Frictional pressure drop of hot fluid in the shell side	Pa
$\Delta p_{N(c)}$	Nozzle pressure drop of cold fluid in the tube side	Pa
$\Delta p_{N(h)}$	Nozzle pressure drop of hot fluid in the shell side	Pa
Q	Heat duty	W
R	Fouling factor	K.m ² /W

Re	Reynolds number	-
Re'	Reynolds number for pressure drop	
t	Temperature of the cold fluid	°C
$\bar{t}$	Average temperature of the cold fluid	°C
T	Temperature of the hot fluid	°C
$\bar{T}$	Average temperature of the hot fluid	°C
U	Overall heat transfer coefficient	W/m ² .K
v	Velocity	m/s
$v_{N(c)}$	Flow velocity of cold fluid in the tube-side nozzle	m/s
$v_{N(h)}$	Flow velocity of hot fluid in the shell-side nozzle	m/s

Greek symbols

ρ	Density	kg/m ³
μ	Viscosity	Pa.s

Subscripts

1	Inlet
2	Outlet
c	Cold fluid (methanol)
h	Hot fluid (water)



Diseño térmico-hidráulico de un intercambiador de calor de doble tubo aleteado para el enfriamiento de acetona.

Thermo-hydraulic design of a finned tube double-pipe heat exchanger for acetone cooling.

Amaury Pérez Sánchez¹ *; Elizabeth Elianne Artigas Cañizares²; Laura Thalia Alvarez Lores³; Elizabeth Ranero González⁴ & Eddy Javier Pérez Sánchez⁵

Recibido: 21/11/2024 – Aceptado: 03/02/2025 – Publicado: 01/07/2025

Artículos de
Investigación ☒

Artículos de
Revisión ☐

Artículos de
Ensayos ☐

* Autor para Correspondencia



Resumen.

Los intercambiadores de calor de flujo a de doble tubo aleteados a contracorriente son considerados muy efectivos, valiosos y ventajosos en la industria de la transferencia de calor. En el presente artículo un intercambiador de calor de doble tubo aleteado fue diseñado aplicando una metodología de diseño bien conocida, con el fin de enfriar 2 kg/s de una corriente de acetona desde 90 °C hasta 30 °C usando agua fría disponible a 5 °C. Varios parámetros de diseño importantes fueron determinados tales como el factor de limpieza y el número de horquillas, así como también la caída de presión y potencia de bombeo de ambas corrientes, entre otros. La carga de calor tuvo un valor de 276 030 W, mientras que se necesitará un caudal másico de agua fría de 3,30 kg/s para enfriar la corriente de acetona. Ambos fluidos fluirán bajo régimen turbulento dentro del intercambiador de calor. El valor del factor de limpieza fue de 0,359, y se necesitarán alrededor de tres horquillas. La caída de presión de ambos fluidos está por debajo del valor máximo establecido por el servicio de transferencia de calor, mientras que las corrientes de agua fría y acetona necesitarán una potencia de bombeo de 3 662 W y 575 W, respectivamente.

Palabras clave.

Intercambiador de calor de doble tubo, tubo aleteado, número de horquillas, caída de presión, potencia de bombeo.

Abstract.

Finned tube double-pipe counter-flow heat exchangers are considered very effective, valuable and advantageous in the heat transfer industry. In the present paper a finned tube double pipe heat exchanger was designed applying a well-known design methodology, in order to cool down 2 kg/s of an acetone stream from 90 °C to 30 °C using chilled water available at 5 °C. Several important design parameters were determined like the cleanliness factor and the number of hairpins, as well as the pressure drop and pumping power of both streams, among others. The heat load had a value of 276,030 W, while a mass flowrate of chilled water of 3.30 kg/s will be needed to cool the acetone stream. Both fluids will flow under turbulent regime inside the heat exchanger. The value of the cleanliness factor was 0.359, and about three hairpins will be needed. The pressure drop of both fluids are below the maximum value established by the heat exchange service, while the chilled water and acetone streams will need a pumping power of 3,662 W and 575 W, respectively.

Keywords.

Double pipe heat exchanger, finned tube, number of hairpins, pressure drop, pumping power.

1. Introducción

Con el desarrollo del conocimiento técnico, la importancia de la ingeniería de transferencia de calor ha aumentado y existe una necesidad constante de enfrentar nuevos desafíos de diseño para mejorar el rendimiento y la eficacia en el campo de la transferencia de calor, especialmente debido al interés en el ahorro energético. Generalmente, los intercambiadores de calor se utilizan ampliamente para este propósito [1].

Los intercambiadores de calor son dispositivos utilizados en numerosas industrias para la transferencia de calor entre fluidos. De los varios tipos de intercambiadores de calor que se emplean a escala industrial, posiblemente los dos más importantes son el intercambiador de doble tubo y el de carcasa y tubo. A pesar de que los intercambiadores de calor de carcasa y tubo generalmente ofrecen una mayor superficie de transferencia de calor, un diseño más compacto, mayor facilidad de limpieza y menor probabilidad de fugas, el intercambiador de calor de doble

¹ University of Camagüey; Faculty of Applied Sciences; amaury.perez84@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-0819-6760>, Camagüey; Cuba.

² University of Camagüey; Faculty of Applied Sciences; elizabeth.artigas@reduc.edu.cu; <https://orcid.org/0009-0003-3416-1355>, Camagüey; Cuba.

³ University of Camagüey; Faculty of Applied Sciences; laura.alvarez@reduc.edu.cu; <https://orcid.org/0009-0007-2643-018X>, Camagüey; Cuba.

⁴ University of Camagüey; Faculty of Applied Sciences; eliza.eddy2202@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-9755-0276>, Camagüey, Cuba.

⁵ Company of Automotive Services S.A.; Commercial Department; eddyjavierpsanchez@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-4481-1262>, Ciego de Ávila, Cuba.

tubo (DPHE, por sus siglas en inglés) aún se utiliza en la práctica hoy en día [2].

Uno de los intercambiadores de calor que ha atraído la atención de investigadores e ingenieros es el DPHE, debido a su simplicidad, eficacia y amplio rango de aplicaciones [3].

Un DPHE (intercambiador de calor de doble tubo) es un tipo distintivo de intercambiador de calor con dos tubos concéntricos, uno dentro del otro. En un DPHE existen dos flujos de fluidos diferentes, de modo que un fluido circula por el interior del tubo interno y el otro fluido lo hace por la región anular situada entre el exterior del tubo interno y el interior del tubo externo [4].

Este sistema consta de dos tubos concéntricos, dos conexiones en T, una cabeza de retorno, una alimentación de retorno y empaques de sellado que sostienen el tubo interior dentro del tubo exterior (Figura 1). Cada uno de los dos fluidos —caliente y frío— fluye ya sea por el interior del tubo interno o por el anillo anular formado entre el exterior del tubo interno y el interior del tubo externo [2].

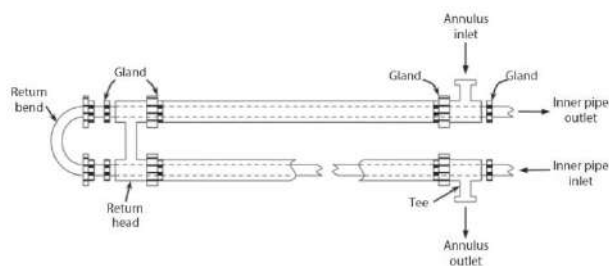


Fig. 1. Intercambiador de calor de doble tubo.
Fuente: [2].

Los DPHE se han utilizado en la industria de procesamiento químico durante más de 100 años. La primera patente de esta unidad apareció en 1923 [2]. Se aplican en varios procesos industriales y áreas de investigación; por ejemplo, en la recuperación de calor residual, para calefacción/enfriamiento en procesos químicos, así como en la industria alimentaria para pasteurizar o precalentar productos líquidos (jugos, purés, jaleas, etc.).

El DPHE es particularmente conveniente porque puede ensamblarse en cualquier taller de tuberías utilizando partes estándar y ofrece una superficie de transferencia de calor económica. La disposición del flujo en este intercambiador de calor puede ser a contracorriente o en paralelo (co-corriente). En la disposición a contracorriente, el fluido en el tubo fluye en dirección opuesta al fluido en el anillo anular. En la disposición en paralelo, ambos fluidos fluyen en la misma dirección. Las variaciones de temperatura del fluido dentro del intercambiador de calor dependen de si el flujo es paralelo o a contracorriente [2].

La aplicación principal del DPHE es para el calentamiento o enfriamiento sensible de fluidos de proceso donde se

requieren áreas pequeñas de transferencia de calor (hasta 50 m²). Este intercambiador de calor también es muy adecuado para manejar fluidos a alta presión, ya que debido al menor diámetro de los tubos. La principal desventaja es que son voluminosos y costosos por unidad de superficie de transferencia de calor [5].

Aunque esta unidad no se emplea extensamente en la industria (la superficie de transferencia de calor es pequeña en comparación con otros intercambiadores), representa un excelente punto de partida desde una perspectiva académica y/o de formación [2].

Según [6], si la corriente contiene sólidos en suspensión, los DPHE también pueden ser una mejor alternativa, ya que pueden construirse con un tubo interior de mayor diámetro para evitar obstrucciones. Los diámetros más pequeños del tubo exterior en los DPHE son eficaces para aplicaciones a alta presión, debido a que requieren un menor espesor de pared. Además, los DPHE se pueden limpiar fácilmente y el flujo longitudinal evita la existencia de regiones de estancamiento, que en los intercambiadores de carcasa y tubo pueden provocar incrustaciones y corrosión. Los DPHE también tienen la ventaja de su robustez gracias a su estructura modular, lo que permite una adaptación más sencilla a ajustes en el proceso.

La creciente necesidad de desarrollar y mejorar la eficacia de los intercambiadores de calor ha dado lugar a una amplia gama de investigaciones para aumentar la tasa de transferencia de calor y, al mismo tiempo, reducir el tamaño y el costo del equipo industrial [3]. La mejora de la transferencia de calor se ha convertido en un factor importante para alcanzar estos objetivos y ha captado el interés de muchos investigadores [7].

La mejora de la transferencia de calor en intercambiadores puede lograrse mediante dos técnicas [7]:

Incremento del coeficiente de convección.

El coeficiente de convección puede mejorarse aumentando la turbulencia, creando flujo secundario e induciendo flujo giratorio. Uno o más de estos mecanismos pueden lograrse mediante el uso de alambre en espiral, aletas, indentaciones, estrías en espiral, tubos con nervaduras transversales, tubos con estrías helicoidales, inserciones de alambre en espiral, cintas retorcidas, paredes acanaladas o con ranuras. También se puede mejorar el coeficiente de convección utilizando fluidos que experimentan una transición de fase o mediante herramientas de mejora electrohidrodinámica y el uso de flujo en forma de neblina.

Expansión del área de transferencia de calor mediante el uso de aletas longitudinales, intercambiadores de calor con alambre sobre tubo.



Otras técnicas aplican ambos efectos. Ejemplos de estas técnicas son las aletas o nervaduras en espiral y las aletas de tira desplazadas (offset strip fins).

Según [4], el rendimiento de los intercambiadores de calor puede mejorarse adoptando procedimientos adecuados. Estos procedimientos incluyen la implementación de superficies extendidas, vibración de la superficie, superficies rugosas y tubos en espiral. Otros autores [7] investigaron numéricamente el efecto de insertar sustratos porosos a ambos lados de la pared que separa los fluidos de trabajo caliente y frío sobre el rendimiento de un intercambiador de calor convencional de tubos concéntricos.

Actualmente, los sistemas térmicos se encuentran entre los sistemas técnicos más dinámicos. Se han explorado y probado numerosos métodos con el fin de aumentar la transferencia de calor en estos sistemas y lograr un alto nivel de rendimiento térmico. Al aprovechar diversos enfoques basados en la mejora de superficies, se puede mejorar la tasa de transferencia de calor de los intercambiadores de calor convencionales. Esta mejora en la tasa de transferencia de calor se debe a las condiciones generadas por el uso de superficies mejoradas. Estas condiciones evitan la formación de la capa límite, incrementan el nivel de turbulencia, aumentan el área de transferencia de calor y generan flujos giratorios y/o flujos secundarios.

Las superficies de transferencia de calor mejoradas tienen varios objetivos, siendo el más importante reducir el tamaño de los intercambiadores de calor, lo que podría traducirse en una disminución de sus costos. Además, reducen la potencia de bombeo necesaria para determinados procesos de intercambio térmico y mejoran el coeficiente de transferencia de calor. A su vez, esto incrementa la eficacia y eficiencia de los procesos térmicos y se traduce en ahorros en los costos operativos [8].

Recientemente, varios investigadores han estudiado formas de mejorar la transferencia de calor por medios pasivos en los intercambiadores de calor de doble tubo (DPHE), como el uso de cintas retorcidas, superficies extendidas o aletas, espirales de alambre y otras herramientas generadoras de turbulencia [9].

El uso de aletas sólidas para aumentar la tasa de transferencia de calor entre dos fluidos diferentes en intercambiadores de calor tubulares es uno de los enfoques más exitosos y ampliamente aplicados. Los tubos aletados son uno de los métodos más comúnmente utilizados para mejorar de forma pasiva la transferencia de calor en tubos circulares. Se aplican para reducir el tamaño del intercambiador necesario para una determinada carga térmica, o para aumentar la tasa de transferencia de calor en un diseño de intercambiador existente. Un tubo con aletas internas puede aumentar sustancialmente el área superficial

y, con ello, mejorar significativamente la tasa de transferencia de calor.

Los tubos aletados se comportan de forma diferente dependiendo de si el flujo es laminar o turbulento. Para ambos regímenes de flujo, laminar y turbulento, los tubos aletados presentan coeficientes de transferencia de calor significativamente mayores en comparación con los tubos lisos correspondientes. El rendimiento de un tubo aletado depende principalmente del tipo de flujo, de la eficiencia de las aletas (que determina el coeficiente de transferencia de calor promedio) y el factor de fricción, que es responsable de la pérdida de presión o de bombeo [10].

El uso de tubos aletados para aumentar la transferencia de calor está cobrando cada vez más importancia en un número creciente de aplicaciones industriales; por ello, el tubo aletado ha sido objeto de varios estudios [8]. En este contexto, [9] investigó la transferencia de calor por convección en un intercambiador de calor de doble tubo a contracorriente con una aleta rectangular curvada y una aleta rectangular en un flujo turbulento, utilizando nanofluidos de agua- Al_2O_3 y agua- TiO_2 .

Además, en [11] se estudió la mejora del rendimiento térmico del material de cambio de fase en un intercambiador de calor de doble tubo mediante el uso de nuevas aletas anulares tipo rejilla. En ese estudio, las aletas anulares tipo rejilla, que consistían en componentes rectos y en tiras circulares, se colocaron sobre el tubo interior.

En otro estudio, [8] realizó una investigación numérica de la mejora de la transferencia de calor en un intercambiador de calor de doble tubo con una superficie extendida en la superficie exterior del tubo interior, añadiendo nanofluidos de alúmina y utilizando simulación por dinámica de fluidos computacional (CFD). Esta investigación se llevó a cabo en números de Reynolds que iban de 250 a 2,500, con un diámetro interior de 20.4 mm. También se analizó el efecto de la geometría de las aletas en forma de U del tubo interior sobre la caída de presión, la distribución de temperatura y el rendimiento térmico.

Asimismo, [12] realizó un análisis numérico de la mejora de la transferencia de calor en un intercambiador de calor de doble tubo con aletas anulares dentadas individuales, concluyendo que el máximo número de Nusselt y el coeficiente de fricción máxima en la pared se obtuvo con 14 aletas dentadas.

Por otro lado, [4] estudió las características de la transferencia de calor por convección en la región anular de un DPHE con aletas innovadoras en forma de diamante. Las aletas con forma de diamante se incrementan longitudinalmente sobre la superficie exterior del tubo interior del DPHE. La disposición del anillo con aletas en forma de diamante fue evaluada considerando diversos



valores de los parámetros geométricos, como la razón de radios, el número de aletas, la altura y el grosor de las aletas. Se calcularon los efectos de estas variables sobre distintos parámetros de rendimiento, tales como el producto del número de Reynolds y el factor de fricción, el número de Nusselt y el factor j . El tipo de aleta evaluado en este estudio se consideró por primera vez en el diseño de DPHE.

En [10], se describió una metodología sencilla semi-empírica y numérica para evaluar las características de transferencia de calor y caída de presión en un intercambiador de calor de tubos aletados con aletas internas y/o externas, la cual puede aplicarse en una amplia gama de condiciones operativas de importancia práctica. En [3], se estudió numéricamente el rendimiento termo-hidráulico de un diseño propuesto de un intercambiador de calor de doble tubo aire-agua con aletas helicoidales en el lado del gas del anillo. Se realizaron simulaciones CFD tridimensionales utilizando el software FLUENT con el objetivo de examinar el flujo de fluido en el lado del gas, la turbulencia, la transferencia de calor y el consumo de energía para diferentes configuraciones del intercambiador de calor.

Además, [13] llevó a cabo diversos experimentos para investigar y comparar la transferencia de calor en un DPHE con flujo a contracorriente, con y sin el uso de aletas triangulares longitudinales. En este estudio se utilizaron aletas triangulares con dimensiones de 9 mm de base, 8 mm de altura y 2 mm de grosor.

Otros autores [6] investigaron la optimización del diseño de un DPHE utilizando programación matemática. Se redujo el área del intercambiador de calor y se consideraron los ajustes termo-fluidodinámicos para aplicar correctamente las ecuaciones de transporte, junto con condiciones de diseño como las caídas de presión máximas permitidas y el área excedente mínima. También se consideraron la estructura modular de este tipo de intercambiador y la distribución de las corrientes (dentro del tubo interior o en el anillo). Asimismo, se propusieron dos enfoques de programación no lineal entera mixta (MINLP, por sus siglas en inglés).

De igual forma, [14] tuvo como objetivo desarrollar nuevos diseños de DPHE para mejorar los procesos de calefacción/enfriamiento con la menor potencia de bombeo posible. En consecuencia, se llevó a cabo un análisis del rendimiento térmico de tres configuraciones de DPHE. Las disposiciones estudiadas fueron: DPHE circular ondulado, DPHE ovalado liso y DPHE ovalado ondulado. Además, se utilizó el DPHE convencional como intercambiador de referencia, y se ejecutó un enfoque CFD validado para llevar a cabo este estudio.

En [15], se examinó experimentalmente el efecto de las aletas helicoidales en el rendimiento de un DPHE agua-aire.

Se evaluó y comparó el rendimiento en términos de tasa media de transferencia de calor, coeficiente de transferencia de calor y eficacia del intercambiador de calor en un tubo interior liso (sin aleta helicoidal) frente a un intercambiador con aletas helicoidales instaladas sobre el tubo interior.

En [1], se investigó el análisis de la transferencia de calor por convección laminar totalmente desarrollada en un diseño innovador de un DPHE aletado con aletas longitudinales de espesor variable en la punta, sometido a condiciones de frontera de tasa constante de transferencia de calor. En este estudio, el rendimiento global del DPHE propuesto fue evaluado teniendo en cuenta el factor de fricción, el número de Nusselt y el factor j . Finalmente, [16] tuvo como objetivo comparar las características de transferencia de calor utilizando diferentes perfiles de aletas para un DPHE bajo diversas condiciones operativas, con el fin de identificar la mejor configuración posible. Las configuraciones seleccionadas en este estudio fueron: rectangular, triangular y parabólica cóncava. El ancho de base, la altura y el número de aletas se mantuvieron idénticos para permitir una comparación específica. La simulación numérica se realizó utilizando un software comercial de CFD. Se compararon y presentaron varios parámetros específicos de transferencia de calor como la desviación de temperatura, la tasa de transferencia de calor, el coeficiente de transferencia de calor y la efectividad de las aletas para los modelos mencionados.

La adición de material poroso como método alternativo para mejorar el intercambio de calor en estos equipos térmicos parece ser una opción prometedora. En este sentido, [17] investigó la mejora de la transferencia de calor cuando se colocan aletas porosas en el cilindro interior de un DPHE. Esta disposición fue seleccionada con el objetivo de aumentar el área de superficie de transferencia de calor entre las aletas y el fluido frío que debe calentarse. También se estudió la influencia de varios parámetros, como el número de Darcy, la altura y el espaciado de las aletas, y la relación de conductividad térmica, sobre los campos hidrodinámico y térmico.

En una planta de procesamiento químico se produce acetona líquida, y se desea enfriar esta corriente de acetona de 90 °C a 30 °C utilizando agua refrigerada disponible a 5 °C. Para llevar a cabo esta operación de intercambio térmico, se ha propuesto un intercambiador de calor de doble tubo con aletas, debido a la disponibilidad de espacio y al presupuesto limitado. Por lo tanto, el presente trabajo tuvo como objetivo diseñar un DPHE con tubos aletados, tanto desde el punto de vista térmico como hidráulico, utilizando la metodología y las correlaciones reportadas en [5] y [18], donde se determinaron varios parámetros de diseño importantes, como el factor de limpieza, el número total de horquillas (hairpins), así como la caída de presión y la potencia de bombeo de ambas corrientes.

2. Materiales y métodos

2.1. Definición del problema

Se requiere enfriar una corriente de acetona de 2 kg/s desde 90 °C hasta 30 °C, utilizando agua refrigerada a 5 °C. La temperatura de salida del agua refrigerada no debe ser superior a 25 °C. Se cuenta con los siguientes parámetros iniciales (Figura 2):

- Longitud de la horquilla (L_t): 4.2 m
- Diámetro nominal del anillo: 2 pulgadas
- Diámetro nominal del tubo interior: $\frac{3}{4}$ pulgada
- Altura de la aleta (H_f): 0.0125 m
- Espesor de la aleta (δ): 0.9 mm
- Número de aletas por tubo (N_f): 28
- Material: Acero al carbono
- Conductividad térmica del acero al carbono (k_m): 52 W/m·K [5]
- Número de tubos dentro del anillo (N_t): 1

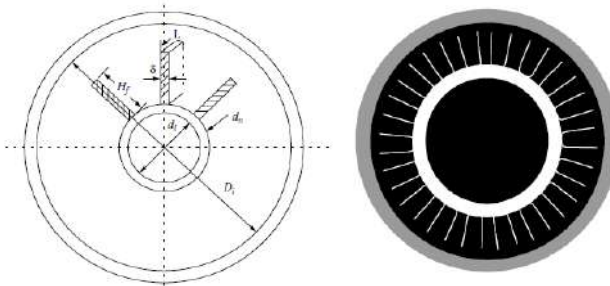


Fig. 2. Sección transversal de un intercambiador de calor con tubo interior aletado longitudinalmente y nomenclatura de los parámetros iniciales.

Fuente: [5].

Según [5], los factores de incrustación para la acetona y el agua son 0.000352 y 0.000176 m²·K/W, respectivamente. Se prefiere que ambas corrientes fluyan en arreglo a contracorriente en el intercambiador de calor diseñado, mientras que la caída de presión de la acetona y del agua refrigerada no debe exceder los 200,000 Pa y 900,000 Pa, respectivamente. Se debe calcular el área de superficie y el número de horquillas (hairpins) del intercambiador de calor, así como las caídas de presión y la potencia de bombeo para ambas corrientes.

- 2.2. Número de horquillas
- Paso 1. Definición de los parámetros iniciales.
- Paso 2. Diámetros del tubo interior y del anillo.
- Paso 3. Temperatura promedio de ambos fluidos:
- Fluido caliente:

$$\bar{T} = \frac{T_1 + T_2}{2} \quad (1)$$

- Fluido frío:

$$\bar{t} = \frac{t_1 + t_2}{2} \quad (2)$$

Paso 4. Propiedades físicas de ambos fluidos a la temperatura promedio del paso anterior.

La Tabla 1 muestra las propiedades físicas que deben definirse para ambos fluidos a la temperatura promedio calculada en el paso anterior.

Tabla 1. Propiedades físicas de ambos fluidos

Propiedad física	Acetona	Agua refrigerada	Unidades
Density	ρ_h	ρ_c	kg/m ³
Viscosity	μ_h	μ_c	Pa.s
Thermal conductivity	k_h	k_c	W/m.K
Heat capacity	Cp_h	Cp_c	J/kg.K

Fuente: Elaboración propia.

Etapas 5. Carga térmica (Q):

$$Q = m_h \cdot Cp_h \cdot (T_1 - T_2) \quad (3)$$

Etapas 6. Caudal másico de agua refrigerada (m_c):

$$m_c = \frac{Q}{Cp_c \cdot (t_2 - t_1)} \quad (4)$$

Paso 7. Ubicación de los fluidos dentro del intercambiador de calor.

Etapas 8. Sección transversal neta en el espacio anular con tubos de aletas longitudinales (A_c):

$$A_c = \frac{\pi}{4} \cdot (D_i^2 - d_o^2 \cdot N_t) - \delta \cdot H_f \cdot N_t \cdot N_f \quad (5)$$

Etapas 9. Perímetro húmedo total del anillo con tubos interiores con aletas longitudinales (P_w):

$$P_w = \pi \cdot (D_i + d_o \cdot N_t) + 2 \cdot H_f \cdot N_f \cdot N_t \quad (6)$$

Paso 10. Diámetro hidráulico (D_h):

$$D_h = \frac{4 \cdot A_c}{P_w} \quad (7)$$

Paso 11. Perímetro de transferencia de calor del anillo de transferencia de calor (P_h):

$$P_h = (\pi \cdot d_o + 2 \cdot H_f \cdot N_f) \cdot N_t \quad (8)$$

Paso 12. Diámetro equivalente para la transferencia de calor (D_e):

$$D_e = \frac{4 \cdot A_c}{P_h} \quad (9)$$

Paso 13. Velocidad del fluido del lado del tubo (u_t):

$$u_t = \frac{m_t}{\rho_t \cdot \frac{\pi \cdot d_i^2}{4}} \quad (10)$$

Paso 14. Número de Reynolds del fluido del lado del tubo (Re_t):

$$Re_t = \frac{\rho_t \cdot u_t \cdot d_i}{\mu_t} \quad (11)$$

Paso 15. Número de Prandtl del fluido del lado del tubo (Pr_t):

$$Pr_t = \frac{Cp_t \cdot \mu_t}{k_t} \quad (12)$$

Etap 16. Número Nusselt del fluido del lado del tubo (Nu_t):

- Régimen laminar ($Re_t < 2,300$):

Temperatura de la pared del tubo (T_w):

$$T_w = 0.5 \cdot (\bar{T} - \bar{t}) \quad (13)$$

Viscosidad del fluido del lado del tubo (μ_t) y del agua (μ_w) a T_w .

Número de Nusselt del fluido del lado del tubo en flujo laminar:

$$Nu_t = 1.86 \cdot \left(Re_t \cdot Pr_t \cdot \frac{d_i}{L_t} \right)^{1/3} \cdot \left(\frac{\mu_t}{\mu_w} \right)^{0.14} \quad (14)$$

- Régimen de transición ($2,300 \leq Re_t \leq 10,000$):

$$\frac{h_t}{Cp_t \cdot \rho_t \cdot u_t} = 0.116 \cdot \left(\frac{Re_t^{0.66} - 125}{Re_t} \right) \cdot \left[1 + \left(\frac{d_i}{L_t} \right)^{0.66} \right] \cdot Pr_t^{0.66} \quad (15)$$

- Régimen turbulento ($10,000 < Re_t < 5,000,000$):

Factor de fricción (f_t):

$$f_t = (1.58 \cdot \ln Re_t - 3.28)^{-2} \quad (16)$$

Número Nusselt (Nu_t):

$$Nu_t = \frac{\left(\frac{f_t}{2} \right) \cdot Re_t \cdot Pr_t}{1.07 + 12.7 \cdot \left(\frac{f_t}{2} \right)^{1/2} \cdot (Pr_t^{2/3} - 1)} \quad (17)$$

Paso 17. Coeficiente de transferencia de calor convectivo del fluido del lado del tubo (h_t):

$$h_t = \frac{Nu_t \cdot k_t}{d_i} \quad (18)$$

Paso 18. Velocidad del fluido anular (u_a):

$$u_a = \frac{m_a}{\rho_a \cdot A_c} \quad (19)$$

Paso 19. Número de Reynolds del fluido anular (Re_a):

$$Re_a = \frac{\rho_a \cdot \mu_a \cdot D_h}{\mu_a} \quad (20)$$

Paso 20. Número de Prandtl del fluido anular (Pr_a):

$$Pr_a = \frac{Cp_a \cdot \mu_a}{k_a} \quad (21)$$

Paso 21. Número Nusselt del fluido anular (Nu_a):

- Régimen laminar ($Re_a < 2,300$):

Viscosidad del fluido anular (μ_a) a T_w .

Número Nusselt del fluido anular:

$$Nu_a = 1.86 \cdot \left(Re_a \cdot Pr_a \cdot \frac{D_h}{L_t} \right)^{1/3} \cdot \left(\frac{\mu_a}{\mu_w} \right)^{0.14} \quad (22)$$

- Régimen de transición ($2,300 \leq Re_a \leq 10,000$):

$$\frac{h_t}{Cp_a \cdot \rho_a \cdot u_a} = 0.116 \cdot \left(\frac{Re_a^{0.66} - 125}{Re_a} \right) \cdot \left[1 + \left(\frac{D_h}{L_t} \right)^{0.66} \right] \cdot Pr_a^{0.66} \quad (23)$$

- Régimen turbulento ($10,000 < Re_a < 5,000,000$):

Factor de fricción (f_a):

$$f_a = (1.58 \cdot \ln Re_a - 3.28)^{-2} \quad (24)$$

Número Nusselt (Nu_a):

$$Nu_t = \frac{\left(\frac{f_a}{2} \right) \cdot Re_a \cdot Pr_a}{1.07 + 12.7 \cdot \left(\frac{f_a}{2} \right)^{1/2} \cdot (Pr_a^{2/3} - 1)} \quad (25)$$

Paso 22. Coeficiente de transferencia de calor convectivo del fluido anular (h_a):

$$h_a = \frac{Nu_a \cdot k_a}{D_e} \quad (26)$$

Paso 23. Área de transferencia de calor con aletas (A_f):

$$A_f = 2 \cdot N_t \cdot N_f \cdot L_t \cdot (2 \cdot H_f + \delta) \quad (27)$$

Paso 24. Área de transferencia de calor sin aletas (A_u):

$$A_u = 2 \cdot N_t \cdot (\pi \cdot d_o \cdot L_t - N_f \cdot L_t \cdot \delta) \quad (28)$$

Paso 25. Área total de la horquilla (A_t):

$$A_t = A_f + A_u \quad (29)$$

Step 26. Factor m:

$$m = \sqrt{\frac{2 \cdot h_a}{\delta \cdot k_m}} \quad (30)$$

Paso 27. Eficacia de las aletas (η_f):

$$\eta_f = \frac{\tanh(m \cdot H_f)}{m \cdot H_f} \quad (31)$$

Paso 28. Eficacia global de la superficie (η_o):

$$\eta_o = \left[1 - (1 - \eta_f) \cdot \frac{A_f}{A_t} \right] \quad (32)$$

Paso 29. Zona de la cámara de aire (A_i):

$$A_i = 2 \cdot \pi \cdot d_i \cdot L_t \quad (33)$$

Paso 30. Coeficiente global de transferencia de calor en condiciones de suciedad (U_{-f}):

$$U_f = \frac{1}{\frac{A_t}{A_i} \cdot \frac{1}{h_t} + \frac{A_t}{A_i} \cdot R_t + \frac{A_t \cdot \ln\left(\frac{d_o}{d_i}\right)}{2 \cdot \pi \cdot k_m \cdot 2 \cdot L_t} + \frac{R_a}{\eta_o} + \frac{1}{\eta_o \cdot h}} \quad (34)$$

Paso 31. Coeficiente global de transferencia de calor en condiciones limpias (U_c):

$$U_c = \frac{1}{\frac{A_t}{A_i} \cdot \frac{1}{h_t} + \frac{A_t \cdot \ln\left(\frac{d_o}{d_i}\right)}{2 \cdot \pi \cdot k_m \cdot 2 \cdot L_t} + \frac{1}{\eta_o \cdot h_a}} \quad (35)$$

Paso 32. Factor de limpieza (CF):

$$CF = \frac{U_f}{U_c} \quad (36)$$

Paso 33. Diferencia logarítmica media de temperatura (LMTD) (para flujo en contracorriente):

$$LMTD = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln\left(\frac{T_1 - t_2}{T_2 - t_1}\right)} \quad (37)$$

Paso 34. Superficie total de transferencia de calor sin incrustaciones (A_{oc}):

$$A_{oc} = \frac{Q}{U_c \cdot LMTD} \quad (38)$$

Paso 35. Superficie total de transferencia de calor con incrustaciones (A_{of}):

$$A_{of} = \frac{Q}{U_f \cdot LMTD} \quad (39)$$

Paso 36. Número de horquillas (N_h):

$$N_h = \frac{A_{of}}{A_t} \quad (40)$$

2.3. Pérdida de carga

Paso 37. Factor de fricción del fluido del lado del tubo (f_t):

Región ($Re_t < 2,300$):

$$f_t = \frac{16}{Re_t} \quad (41)$$

Factor de fricción del fluido del lado del tubo en flujo laminar:

$$f_t' = f_t \cdot \left(\frac{\mu_t}{\mu_w}\right)^{-0.58} \quad (42)$$

- Régimen turbulento ($4,000 < Re_t < 5,000,000$):
 $f_t' = 0.00140 + 0.125 \cdot Re_t^{-0.32}$ (43)

Paso 38. Pérdida de carga del fluido del lado del tubo (Δp_t):

$$\Delta p_t = 4 \cdot f_t' \cdot \frac{2 \cdot L_t}{d_i} \cdot \rho_t \cdot \frac{u_t^2}{2} \cdot N_h \quad (44)$$

Paso 39. Factor de fricción del fluido anular (f_a):

- Región laminar ($Re_a < 2,300$):

$$f_a = \frac{16}{Re_a} \quad (45)$$

Factor de fricción del fluido anular en flujo laminar:

$$f_a' = f_a \cdot \left(\frac{\mu_a}{\mu_w}\right)^{-0.58} \quad (46)$$

- Régimen turbulento ($4,000 < Re_a < 5,000,000$):
 $f_a' = 0.00140 + 0.125 \cdot Re_a^{-0.32}$ (47)

Paso 40. Pérdida de carga del fluido anular (Δp_a):

$$\Delta p_a = 4 \cdot f_a' \cdot \frac{2 \cdot L_t}{D_h} \cdot \rho_a \cdot \frac{u_a^2}{2} \cdot N_h \quad (48)$$

2.4. Potencia de bombeo.

Paso 41. Potencia de bombeo necesaria para el fluido del lado del tubo (P_t):

$$P_t = \frac{m_t \cdot \Delta p_t}{\rho_t \cdot \eta_p} \quad (49)$$

Donde η_p es el rendimiento de la bomba = 0.80 - 0.85 [5].

Paso 42. Potencia de bombeo necesaria para el fluido anular (P_a):

$$P_a = \frac{m_a \cdot \Delta p_a}{\rho_a \cdot \eta_p} \quad (50)$$

3. Resultados.

A continuación se muestran los valores de los principales parámetros de diseño calculados para el intercambiador de calor de doble tubo con aletas propuesto, que incluyen el número calculado de horquillas, así como la caída de presión y la potencia de bombeo para ambas corrientes.

3.1. Número de horquillas.

Paso 1. Definición de los parámetros iniciales:

La tabla 2 muestra los parámetros iniciales necesarios para diseñar el intercambiador de calor de doble tubo.

Tabla 2. Parámetros iniciales disponibles.

Parámetros	Símbolo	Valor	Unidades
Caudal másico de la acetona	m_h	2.00	kg/s
Temperatura de entrada de la acetona	T_1	90	°C
Temperatura de salida de la acetona	T_2	30	°C
Temperatura de entrada del agua	t_1	5	°C
Temperatura de salida del agua	t_2	25	°C
Factor de incrustación de la acetona	R_h	0.000352	m ² .K/W
Factor de incrustación del agua	R_c	0.000176	m ² .K/W



Caída de presión
máxima para la
acetona Δp_{hm} 200,000 Pa

Caída de presión
máxima para el agua Δp_{cm} 900,000 Pa

Fuente: Elaboración propia

Paso 2. Diámetros del tubo interior y del anillo

A continuación se presentan los valores de los diámetros interior y exterior para un tubo interior con un diámetro nominal de ¾ pulgada, Schedule 40, así como el diámetro interior del anillo con un diámetro nominal de 2 pulgadas, Schedule 40, según lo reportado por [19]:

Diámetro interior del tubo (d_i) = 0.02093 m

Diámetro exterior del tubo (d_o) = 0.02667 m

Diámetro interior del anillo (D_i) = 0.0525 m

Paso 3. Temperatura promedio de ambos fluidos:

- Acetona:

$$\bar{T} = \frac{T_1 + T_2}{2} = \frac{90 + 30}{2} = 60^\circ\text{C} \quad (1)$$

- Agua:

$$\bar{t} = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{5 + 25}{2} = 15^\circ\text{C} \quad (2)$$

Paso 4. Propiedades físicas de ambos fluidos a la temperatura promedio del paso anterior

La Tabla 3 muestra los valores de las propiedades físicas de ambos fluidos, los cuales fueron determinados según los datos reportados en [19].

Tabla 3. Propiedades físicas de ambos fluidos.

Propiedad física	Acetona	Agua refrigerada	Unidades
Densidad	745.20	999.10	kg/m ³
Viscosidad	0.000229	0.00114	Pa.s
Conductividad térmica	0.146	0.589	W/m.K
Capacidad calorífica	2,300.25	4,188.47	J/kg.K

Fuente: Elaboración propia

Paso 5. Carga térmica (Q):

$$Q = m_h \cdot C_{p_h} \cdot (T_1 - T_2) \quad (3)$$

$$Q = 2.00 \cdot 2,300 \cdot (90 - 30) = 276,030 \text{ W}$$

Paso 6. Caudal másico de agua refrigerada (m_c):

$$m_c = \frac{Q}{C_{p_c} \cdot (t_2 - t_1)} \quad (4)$$

$$m_c = \frac{276,030}{4,188.47 \cdot (25 - 5)} = 3.30 \text{ kg/s}$$

Paso 7. Ubicación de los fluidos en el interior del intercambiador de calor:

De acuerdo con las sugerencias de [2] y [20], el fluido frío (agua) se situará en el interior del tubo interior, mientras que el fluido caliente (acetona) fluirá por el anillo. Así, la Tabla 4 presenta los antiguos y nuevos símbolos que presentarán los parámetros iniciales para ambos fluidos, teniendo en cuenta la ubicación seleccionada de los fluidos. Es decir, los subíndices y serán sustituidos por y , respectivamente, para todos los parámetros iniciales y propiedades físicas de ambos fluidos.

Tabla 4. Símbolos anteriores y nuevos de los parámetros iniciales para ambos fluidos.

Parámetro	Antiguo símbolo	Nuevo símbolo	Unidades
Caudal másico de la acetona	m_h	m_a	kg/s
Caudal másico del agua	m_c	m_t	kg/s
Densidad de la acetona	ρ_h	ρ_a	kg/m ³
Densidad del agua	ρ_c	ρ_t	kg/m ³
Viscosidad de la acetona	μ_h	μ_a	Pa.s
Viscosidad del agua	μ_c	μ_t	Pa.s
Conductividad térmica de la acetona	k_h	k_a	W/m.K
Conductividad térmica del agua	k_c	k_t	W/m.K
Capacidad calorífica de la acetona	C_{p_h}	C_{p_a}	J/kg.K
Capacidad calorífica del agua	C_{p_c}	C_{p_t}	J/kg.K
Factores de incrustación de la acetona	R_h	R_a	m ² .K/W
Factores de incrustación del agua	R_c	R_t	m ² .K/W

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 5 muestra los resultados de los parámetros determinados en los pasos 8 a 17.

Tabla 5. Resultados de los parámetros determinados en los pasos 8 a 17.

Paso	Parámetro	Símbolo	Valor	Unidades	Equat.
8	Área neta de la sección transversal en el anillo con tubos interiores aletados longitudinalmente	A_c	0.00129	m ²	(5)
9	Perímetro total mojado del anillo con tubos interiores aletados longitudinalmente	P_w	0.949	m	(6)
10	Diámetro hidráulico	D_h	0.0054	m	(7)

11	Perímetro de transferencia de calor del anillo para la transferencia de calor	P_h	0.784	m	(8)
12	Diámetro equivalente para la transferencia de calor	D_e	0.0066	m	(9)
13	Velocidad del agua	u_t	9.60	m/s	(10)
14	Número de Reynolds del agua	Re_t	176,094	-	(11)
15	Número de Prandtl del agua	Pr_t	8.10	-	(12)
16	Factor de fricción	f_t	0.0040	-	(16)
16	Número de Nusselt del agua	Nu_t	1,017.6	-	(17)
17	Coefficiente de transferencia de calor por convección del agua	h_t	28,637	W/m ² .K	(18)

Dado que $Re_t > 10,000$, el fluido del lado del tubo fluye bajo régimen turbulento; por lo tanto, se utilizarán las ecuaciones (16) y (17) para determinar el número de Nusselt.

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 6 muestra los resultados de los parámetros calculados en los pasos 18 a 22.

Tabla 6. Resultados de los parámetros determinados en los pasos 18 a 22.

Paso	Parámetro	Símbolo	Valor	Unidades	Equat.
18	Velocidad de la acetona	u_a	2.08	m/s	(19)
19	Número de Reynolds de la acetona ¹	Re_a	36,550.6	-	(20)
20	Número de Prandtl de la acetona	Pr_a	3.61	-	(21)
21	Factor de fricción	f_a	0.0056	-	(24)
21	Número de Nusselt de la acetona	Nu_a	186.69	-	(25)
22	Coefficiente de transferencia de calor por convección de la acetona	h_a	4,127.6	W/m ² .K	(26)

Dado que $Re_a > 10,000$, el fluido del anillo fluye bajo régimen turbulento; por lo tanto, se utilizarán las ecuaciones (24) y (25) para determinar el número de Nusselt.

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 7 muestra los resultados de los parámetros calculados en los pasos 23 a 36.

Tabla 7. Resultados de los parámetros determinados en los pasos 23 a 36.

Paso	Parámetro	Símbolo	Valor	Unidades	Equat.
23	Área de transferencia de calor aletada	A_f	6.092	m ²	(27)
24	Área de transferencia de calor sin aletas	A_u	0.492	m ²	(28)
25	Área total del serpentín	A_t	6.584	m ²	(29)
26	Factor	m	420	-	(30)
27	Eficiencia de la aleta	η_f	0.190	-	(31)
28	Eficiencia superficial total	η_o	0.250	-	(32)
29	Área del tubo interior	A_i	0.552	m ²	(33)
30	Coefficiente global de transferencia de calor (con incrustaciones)	U_f	182.65	W/m ² .K	(34)
31	Coefficiente global de transferencia de calor (limpio)	U_c	508.39	W/m ² .K	(35)
32	Factor de limpieza	CF	0.359	-	(36)
33	Diferencia de temperatura media logarítmica	$LMTD$	41.86	°C	(37)
34	Área total de superficie de transferencia de calor sin incrustaciones	A_{oc}	12.97	m ²	(38)
35	Área total de superficie de transferencia de calor con incrustaciones	A_{of}	36.10	m ²	(39)
36	Número de horquillas	N_h	2.78 ≈ 3	-	(40)

Fuente: Elaboración propia

3.2. Caída de presión.

Dado que el fluido del lado del tubo (agua) fluye bajo régimen turbulento ($Re_t = 176,094 > 10,000$), se utilizaron las ecuaciones (43) y (44) para determinar la caída de presión de este fluido. Por lo tanto:

Paso 37. Factor de fricción del agua (f_t) para régimen turbulento:

$$f_t = 0.00140 + 0.125 \cdot Re_t^{-0.32} = 0.0040 \quad (43)$$

Paso 38. Caída de presión del agua (Δp_t):

$$\Delta p_t = 4 \cdot f_t \cdot (2 \cdot L_t) / d_i \cdot \rho_t \cdot (u_t^2) / 2 \cdot N_h = 886,903 \text{ Pa} \quad (44)$$

Como el fluido del anillo (acetona) fluye bajo régimen turbulento ($Re_a = 36,550.6 > 10,000$), se utilizaron las ecuaciones (47) y (48) para determinar la caída de presión de este fluido. Por lo tanto:

Paso 39. Factor de fricción de la acetona (f_a) para régimen turbulento:

$$f_a = 0.00140 + 0.125 \cdot Re_a^{-0.32} = 0.0057 \quad (47)$$

Paso 40. Caída de presión de la acetona (Δp_a):



$$\Delta p_a = 4 \cdot f_a \cdot (2 \cdot L_t) / D_h \cdot \rho_a \cdot (u_a^2) / 2 \cdot N_h = 171,518 \text{ Pa} \quad (48)$$

3.3. Potencia de bombeo.

Paso 41. Potencia de bombeo requerida para el agua (P_t):

$$P_t = (m_t \cdot [\Delta p]_t) / (\rho_t \cdot \eta_p) = 3,662 \text{ W} \quad (49)$$

Paso 42. Potencia de bombeo requerida para la acetona (P_a):

$$P_a = (m_a \cdot [\Delta p]_a) / (\rho_a \cdot \eta_p) = 575 \text{ W} \quad (50)$$

4. Discusión.

La carga térmica necesaria para enfriar el flujo de acetona fue de 276,030 W, mientras que el caudal másico de agua fría requerido para el proceso de intercambio térmico es de 3.30 kg/s. La velocidad del agua fría (9.60 m/s) es 4.61 veces mayor que la velocidad de la acetona (2.08 m/s). Esto se debe al mayor valor del caudal másico de agua fría (3.30 kg/s) en comparación con el caudal másico de acetona (2.0 kg/s), así como al mayor valor del parámetro área neta de la sección transversal en el anillo con tubos aletas longitudinales (0.00129 m²) usado en la ecuación (19), en comparación con el valor del término ($\pi \cdot d_i$)/4 (0.00034 m²) usado en la ecuación (10).

El número de Reynolds del agua fría (176,094) es aproximadamente 4.82 veces mayor que el número de Reynolds de la acetona (36,550.6), lo cual se debe al mayor valor de la velocidad (9.60 m/s) y la densidad (999.10 kg/m³) del agua fría en comparación con los valores de estos parámetros para la acetona (velocidad de 2.08 m/s y densidad de 745.20 kg/m³). Además, el mayor valor obtenido para el diámetro interno del tubo (0.02093 m), en comparación con el valor del diámetro hidráulico (0.0054 m), influyó en este resultado. Como se mencionó anteriormente, los fluidos fluirán en régimen turbulento dentro del DPHE diseñado, dado que los valores calculados del número de Reynolds para ambos fluidos son mayores a 10,000.

En cuanto al número de Nusselt, el valor de este parámetro para el agua fría (1,017.61) es 5.45 veces mayor que el número de Nusselt de la acetona (186.69), debido a los mayores valores obtenidos del número de Reynolds (176,094) y número de Prandtl (8.10) para el agua fría en comparación con los valores de estos parámetros para la acetona (número de Reynolds de 36,550.6 y número de Prandtl de 3.61).

Respecto al coeficiente convectivo de transferencia de calor, el valor de este parámetro para el agua fría (28,637 W/m²·K) es 6.94 veces mayor que el valor obtenido para la acetona. Esto se debe principalmente al mayor valor del número de Nusselt (1,017.61) y la conductividad térmica (0.589 W/m·K) obtenidos para el agua fría en comparación con los valores de estos parámetros para la acetona (número

de Nusselt de 186.69 y conductividad térmica de 0.146 W/m·K).

El valor calculado de la eficiencia de la aleta fue 0.190, lo cual puede considerarse bajo. Esto se debe principalmente al alto valor obtenido para el coeficiente convectivo de transferencia de calor de la acetona (4,127.6 W/m²·K), que a su vez incrementa el valor del factor (ecuación 30), disminuyendo así la eficiencia de la aleta (ecuación 31). La eficiencia global de la superficie tuvo un valor de 0.250, lo cual también puede considerarse bajo. El bajo valor obtenido para la eficiencia de la aleta influyó en el bajo valor de la eficiencia global de la superficie.

El coeficiente global de transferencia de calor en condiciones limpias (U_c) tuvo un valor de 508.39 W/m²·K, que es 2.78 veces mayor que el coeficiente global de transferencia de calor en condiciones con ensuciamiento (182.65 W/m²·K). El valor calculado de U_c concuerda con los rangos reportados por [5] y [18] para este tipo de servicio de transferencia de calor.

El factor de limpieza tuvo un valor de 0.359, lo cual puede considerarse bajo. Esto se debe al pequeño valor obtenido para el coeficiente global de transferencia de calor en condiciones con ensuciamiento (182.65 W/m²·K) y el alto valor del coeficiente global de transferencia de calor en superficie limpia (508.39 W/m²·K). El valor del factor de limpieza calculado en este estudio es menor que el valor sugerido por [5] para diseños típicos (0.85). Según [5], el factor de limpieza es un término desarrollado para la industria de generación de vapor que proporciona una tolerancia para el ensuciamiento y que relaciona el coeficiente global de transferencia de calor cuando el intercambiador está sucio con cuando está limpio. Este enfoque ofrece una tolerancia al ensuciamiento que varía directamente con el coeficiente global de transferencia de calor en superficie limpia (U_c), y aunque el factor de limpieza resulta en tendencias favorables, el diseñador aún debe seleccionar el factor CF adecuado para su aplicación [5].

El área total de superficie de transferencia de calor con y sin ensuciamiento fue de 36.10 m² y 12.97 m², respectivamente; por lo tanto, se necesitarán alrededor de 3 serpentines para el intercambiador de tubo aletas diseñado (Figura 3). Los valores calculados de la caída de presión para el agua fría y la acetona fueron de 886,903 Pa y 171,518 Pa, respectivamente, que están por debajo de los valores máximos permitidos establecidos por el proceso para ambos fluidos (900,000 Pa y 200,000 Pa para agua fría y acetona, respectivamente). Cabe mencionar que la caída de presión del agua fría es 5.17 veces mayor que la caída de presión de la acetona, lo cual se debe esencialmente al mayor valor obtenido para la velocidad (9.60 m/s) y la densidad (999.10 kg/m³) del agua fría en comparación con los valores



obtenidos para la acetona (velocidad y densidad de 2.08 m/s y 745.20 kg/m³, respectivamente).

Finalmente, la potencia de bombeo requerida para el agua fría (3,662 W) es 6.37 veces mayor que la potencia requerida para la acetona (575 W), lo que se debe en gran medida al mayor valor de caída de presión obtenido para el flujo de agua fría en comparación con el valor de caída de presión para la acetona.

Fig. 3. Esquema del intercambiador de calor de tubo aletas diseñado con los tres serpentines y fluidos fluyendo en arreglo contracorriente.

Fuente: Elaboración propia.

En [5], se diseñó un intercambiador de calor de tubo aletas para enfriar 3 kg/s de un flujo de aceite de motor de 65 °C a 55 °C usando agua de mar disponible a 20 °C, donde el agua de mar (fluido frío) estaba ubicada en el tubo interior y el aceite de motor en el anillo. Entre los resultados obtenidos, el régimen de flujo en el tubo interior es turbulento y en el anillo es laminar; la eficiencia de las aletas y la eficiencia global de la superficie tienen valores de 0.682 y 0.703, respectivamente; los coeficientes globales de transferencia de calor en condiciones con y sin ensuciamiento son 108.6 W/m²·K y 127.6 W/m²·K, respectivamente; el factor de limpieza es 0.85 y serán necesarios dos serpentines para este servicio de transferencia de calor. Finalmente, la caída de presión y la potencia de bombeo para el agua de mar son 135 kPa y 237.3 W, respectivamente, mientras que la caída de presión y la potencia para el aceite de motor (en régimen laminar) son 7.5 MPa y 31.8 kW, respectivamente.

En [2] se diseñó otro intercambiador de tubo aletas utilizando la metodología de diseño de Kern, donde se desea enfriar 8,165 kg/h de gasoil 28 °API de 121 °C a 93 °C usando agua a 27 °C como medio de enfriamiento. En este proyecto de diseño, el fluido caliente (gasoil) se ubicó en el anillo, mientras que el fluido frío (agua) estuvo en el tubo interior. Los valores para la eficiencia de la aleta y la eficiencia global de la superficie son 0.307 y 1.54, respectivamente; mientras que los coeficientes globales de transferencia en condiciones limpias y con ensuciamiento (de diseño) tienen valores de 1,618.3 W/m²·K y 670 W/m²·K, respectivamente. Es necesario usar cuatro serpentines y las caídas de presión calculadas en el anillo y tubo interior son 62,604.39 Pa y 10,824.77 Pa, respectivamente.

5. Conclusiones.

Se diseñó un intercambiador de calor de tubo doble con aletas desde los puntos de vista térmico e hidráulico, utilizando la metodología y correlaciones reportadas en [5] y [18], donde se determinaron varios parámetros de diseño, como el factor de limpieza y el número de serpentines, así como la caída de presión y la potencia de bombeo de ambas corrientes, entre otros. La carga térmica tuvo un valor de

276,030 W, mientras que se necesitará un caudal másico de agua fría de 3.30 kg/s para enfriar el flujo de acetona. Considerando los valores calculados del número de Reynolds para el agua fría (176,094) y la acetona (36,550.6), ambas corrientes fluirán en régimen turbulento dentro del intercambiador de tubo doble con aletas diseñado, mientras que los coeficientes convectivos de transferencia de calor para el agua fría y la acetona fueron de 28,637 y 4,127.6 W/m²·K, respectivamente. El coeficiente global de transferencia de calor en condiciones con y sin ensuciamiento tuvo valores de 182.65 y 508.39 W/m²·K, respectivamente, mientras que el factor de limpieza fue de 0.359. El área total de superficie de transferencia de calor sin y con ensuciamiento tuvo valores de 12.97 y 36.10 m², respectivamente. El intercambiador de tubo aletas diseñado necesitará tres serpentines, y la caída de presión tanto del agua fría (886,903 Pa) como de la acetona (171,518 Pa) están por debajo de los valores máximos establecidos por el proceso de intercambio térmico. La corriente de agua fría requerirá una potencia de bombeo de 3,662 W, mientras que la potencia de bombeo requerida por el flujo de acetona será de 575 W.

6.- Author Contributions.

1. Conceptualization: Amaury Pérez Sánchez.
2. Data curation: Laura Thalía Alvarez Lores.
3. Formal Analysis: Amaury Pérez Sánchez, Elizabeth Elianne Artigas Cañizares.
4. Acquisition of funds: Not applicable.
5. Research: Amaury Pérez Sánchez, Elizabeth Elianne Artigas Cañizares, Laura Thalía Alvarez Lores.
6. Methodology: Amaury Pérez Sánchez.
7. Project management: Not applicable.
8. Resources: Not applicable.
9. Software: Not applicable.
10. Supervision: Amaury Pérez Sánchez.
11. Validation: Amaury Pérez Sánchez.
12. Visualization: Not applicable.
13. Writing – original draft: Elizabeth Elianne Artigas Cañizares, Laura Thalía Alvarez Lores
14. Writing – revision and editing: Amaury Pérez Sánchez.

7.- Referencias.

- [1] K. S. Syed, M. Ishaq, Z. Iqbal, and A. Hassan, "Numerical study of an innovative design of a finned double-pipe heat exchanger with variable fin-tip thickness," *Energy Conversion and Management*, vol. 98, pp. 69-80, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2015.03.038>
- [2] M. Flynn, T. Akashige, and L. Theodore, *Kern's Process Heat Transfer*, 2nd ed. Beverly, USA: Scrivener Publishing, 2019.
- [3] A. Faisal and S. Jain, "Analysis of a Double Pipe Heat Exchanger with Straight and Helical Fins," *International Journal of Science, Engineering and Technology*, vol. 9, no. 4, pp. 1-6, 2021.
- [4] M. Ishaq, A. Ali, M. Amjad, K. S. Syed, and Z. Iqbal, "Diamond-Shaped Extended Fins for Heat Transfer Enhancement in a Double-Pipe Heat Exchanger: An Innovative Design," *Applied Sciences*, vol. 11, p. 5954, 2021. <https://doi.org/10.3390/app11135954>
- [5] S. Kakaç, H. Liu, and A. Pramuanjaroenkij, *Heat Exchangers - Selection, Rating and Thermal Design*, 3rd ed. Boca Raton, USA: Taylor & Francis Group, 2012.



- [6] Peccini, J. C. Lemos, A. L. H. Costa, and M. J. Bagajewicz, "Optimal Design of Double Pipe Heat Exchanger Structures," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 58, p. 12080–12096, 2019. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.9b01536>
- [7] M. K. Alkam and M. A. Al-Nimr, "Improving the performance of double-pipe heat exchangers by using porous substrates," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 42, pp. 3609–3618, 1999.
- [8] M. F. Hasan, M. Danismaz, and B. M. Majel, "Thermal performance investigation of double pipe heat exchanger embedded with extended surfaces using nanofluid technique as enhancement," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 43, p. 102774, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.102774>
- [9] Jalili, N. Aghaee, P. Jalili, and D. D. Ganji, "Novel usage of the curved rectangular fin on the heat transfer of a double-pipe heat exchanger with a nanofluid," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 35, p. 102086, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102086>
- [10] G. A. Rao and Y. Levy, "A semi empirical methodology for performance estimation of a double pipe finned heat exchanger," presented at the 9th Biennial ASME Conference on Engineering Systems Design and Analysis (ESDA08), Haifa, Israel, 2008.
- [11] M. Sanchouli, S. Payan, A. Payan, and S. A. Nada, "Investigation of the enhancing thermal performance of phase change material in a double-tube heat exchanger using grid annular fins," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 34, p. 101986, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.101986>
- [12] J. Mansour, Z. K. Kadhim, and K. A. Hussein, "CFD study of Heat Transfer Characteristics for Annular Serrated Finned-Tube Heat Exchanger," *Journal of Computer and Engineering Technology*, vol. 5, no. 1, pp. 77–87, 2018.
- [13] V. Mathanraj, V. L. Krishna, J. L. V. Babu, and S. A. Kumar, "Experimental investigation on heat transfer in double pipe heat exchanger employing triangular fins," *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, vol. 402, p. 012137, 2018. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/402/1/012137>
- [14] S. Al-Zahrani, "Heat transfer characteristics of innovative configurations of double pipe heat exchanger," *Heat and Mass Transfer*, pp. 1–15, 2023. <https://doi.org/10.1007/s00231-023-03360-0>
- [15] S. Sivalakshmi, M. Raja, and G. Gowtham, "Effect of helical fins on the performance of a double pipe heat exchanger," *Materials Today: Proceedings*, vol. 43, pp. 1128–1131, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.563>
- [16] S. Kumar, K. V. Karanth, and K. Murthy, "Numerical study of heat transfer in a finned double pipe heat exchanger," *World Journal of Modelling and Simulation*, vol. 11, no. 1, pp. 43–54, 2015.
- [17] H. Kahalerras and N. Targui, "Numerical analysis of heat transfer enhancement in a double pipe heat exchanger with porous fins," *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, vol. 18, no. 5, pp. 593–617, 2008. <http://dx.doi.org/10.1108/09615530810879738>
- [18] E. Cao, "Heat transfer in process engineering," New York, USA: McGraw-Hill, 2010.
- [19] W. Green and M. Z. Southard, *Perry's Chemical Engineers' Handbook*, 9th ed. New York, USA: McGraw-Hill Education, 2019.
- [20] R. Sinnott and G. Towler, *Chemical Engineering Design*, 6th ed. Oxford, United Kingdom: Butterworth-Heinemann, 2020.

Nomenclature

A_c	Net cross-sectional area in the annulus with longitudinal finned tubes	m^2
A_f	Finned heat transfer area	m^2
A_i	Area of the inner tube	m^2
A_{oc}	Total heat transfer surface area without fouling	m^2
A_{of}	Total heat transfer surface area with fouling	m^2
A_t	Total area of hairpin	m^2
A_u	Unfinned heat transfer area	m^2
C_p	Heat capacity	J/kg.K
CF	Cleanliness factor	-
d_i	Inner diameter of tube	m

d_o	Outer diameter of tube	m
D_e	Equivalent diameter for heat transfer	m
D_h	Hydraulic diameter	m
D_i	Inner diameter of annulus	m
f	Friction factor for heat transfer	-
f'	Friction factor for pressure drop	-
h	Convective heat transfer coefficient	W/m ² .K
H_f	Fin height	m
k	Thermal conductivity	W/m.K
k_m	Thermal conductivity of the inner tube material	W/m.K
L_t	Length of hairpin	m
LMTD	Log-mean temperature difference	°C
m	Mas flowrate	kg/s
m	Factor	-
N_f	Number of fins per tube	-
N_h	Number of hairpins	-
N_t	Number of tubes inside the annulus	-
Nu	Nusselt number	-
Δp	Pressure drop	Pa
Δp_m	Maximum allowable pressure drop	Pa
P	Pumping power	W
P_h	Heat transfer perimeter of the annulus for heat transfer	m
Pr	Prandtl number	-
P_w	Total wetted perimeter of the annulus with longitudinally finned inner tubes	m
Q	Heat load	W
R	Fouling factor	m ² .K/W
Re	Reynolds number	-
t	Temperature of the cold fluid	°C
T	Temperature of the hot fluid	°C
T_w	Tube wall temperature	°C
$\bar{t}$	Average temperature of the cold fluid	°C
$\bar{T}$	Average temperature of the hot fluid	°C
u	Velocity	m/s
U_c	Overall heat transfer coefficient under clean conditions	W/m ² .K
U_f	Overall heat transfer coefficient under fouling conditions	W/m ² .K

Greek symbols

ρ	Density	kg/m ³
μ	Viscosity	Pa.s
δ	Fin thickness	m
η_f	Fin efficiency	-
η_o	Overall surface efficiency	-

Subscripts

1	Inlet
2	Outlet
c	Cold fluid
h	Hot fluid
a	Annulus fluid
t	Tube side fluid



Propuesta Ergonómica Integral para la Reducción de Riesgos Musculoesqueléticos en la Producción de Jabones: Un Enfoque Basado en Análisis Estadístico y Evaluación Postural

Comprehensive Ergonomic Proposal for the Reduction of Musculoskeletal Risks in Soap Production: An Approach Based on Statistical Analysis and Postural Assessment.

Genesis Elizabeth Castro Rosales ¹ * ; Ashly Dayanna Torres Alvarado ² ; Luis Stalin Zalamea Cedeño ³ ; Francisco Javier Duque-Aldaz ⁴ & Fernando Raúl Rodríguez-Flores ⁵

Recibido: 05/10/2024 – Aceptado: 29/05/2025 – Publicado: 01/07/2025

Artículos de
Investigación



Artículos
de Revisión



Artículos
de Ensayos



* Autor para correspondencia.



* Autor para la correspondencia.

Resumen

En la industria de producción de jabones, los trabajadores enfrentan riesgos ergonómicos significativos debido a tareas repetitivas, manipulación de cargas y posturas forzadas, lo que puede causar lesiones musculoesqueléticas, fatiga y estrés, afectando la salud y productividad. La investigación tuvo por objetivo diseñar una propuesta ergonómica integral para mejorar las condiciones físicas y reducir los riesgos ergonómicos en la línea de producción de jabones, mediante la identificación de riesgos y el desarrollo de soluciones prácticas basadas en un análisis exhaustivo. Se realizó un diagnóstico inicial mediante encuestas ergonómicas y observaciones in situ. Se analizaron las respuestas utilizando métodos estandarizados de evaluación postural y pruebas estadísticas (chi-cuadrado, V de Cramer, Lambda). Se identificaron los principales riesgos ergonómicos y se formularon recomendaciones y soluciones prácticas. Como resultados se obtuvo que: un 67% de los trabajadores reportó mantener posturas forzadas del cuello durante más de 2 horas continuas, y un 58% del tronco. Un 42% realiza movimientos repetitivos de brazos y muñecas durante más de 4 horas continuas, y un 33% manipula cargas manualmente de más de 25 kg. Además, un 17% está expuesto a vibraciones y un 25% a temperaturas extremas. La falta de formación en ergonomía fue reportada por el 100% de los trabajadores. Los análisis estadísticos revelaron asociaciones significativas entre variables ergonómicas, proporcionando una base sólida para la formulación de propuestas de mejora. La investigación confirmó la alta prevalencia de riesgos ergonómicos en la producción de jabones, subrayando la necesidad de intervenciones ergonómicas proactivas para mejorar la salud y productividad de los trabajadores.

Palabras claves: Ergonomía; Riesgos Ergonómicos; Trastornos Musculoesqueléticos (TME); Posturas Forzadas; Movimientos Repetitivos; Manipulación De Cargas.

Abstract

In the soap production industry, workers face significant ergonomic risks due to repetitive tasks, load handling and forced postures, which can cause musculoskeletal injuries, fatigue and stress, affecting health and productivity. The objective of the research was to design a comprehensive ergonomic proposal to improve physical conditions and reduce ergonomic risks in the soap production line by identifying risks and developing practical solutions based on a comprehensive analysis. An initial diagnosis was made through ergonomic surveys and on-site observations. Responses were analyzed using standardized postural assessment methods and statistical tests (chi-square, Cramer's V, Lambda). The main ergonomic risks were identified and recommendations and practical solutions were formulated. The results showed that 67% of the workers reported maintaining forced neck postures for more than 2 continuous hours, and 58% of the trunk postures. Forty-two percent perform repetitive movements of the arms and wrists for more than 4 continuous hours, and 33% manually handle loads of more than 25 kg. In addition, 17% are exposed to vibrations and 25% to extreme temperatures. Lack of ergonomics training was reported by 100% of the workers. Statistical analyses revealed significant associations between ergonomic variables, providing a solid basis for the formulation of improvement proposals. The research confirmed the high prevalence of ergonomic risks in soap production, underlining the need for proactive ergonomic interventions to improve workers' health and productivity.

Keywords: Ergonomics; Ergonomic Risks; Musculoskeletal Disorders (MSD); Forced Postures; Repetitive Movements; Load Handling.

1.- Introducción.

En la industria de producción de jabones, los trabajadores enfrentan riesgos ergonómicos significativos debido a tareas repetitivas, manipulación de cargas y posturas forzadas. Estas condiciones pueden causar lesiones musculoesqueléticas, fatiga y estrés, afectando la salud de los empleados y la productividad de la empresa.

A pesar de la importancia de la ergonomía, muchas empresas no implementan propuestas ergonómicas

integrales, exponiendo a los trabajadores a condiciones desfavorables que aumentan el riesgo de lesiones y ausentismo laboral.

Es crucial que las empresas adopten medidas proactivas para evaluar y mejorar las condiciones ergonómicas. Una propuesta ergonómica específica para la producción de jabones puede identificar riesgos y desarrollar soluciones prácticas, mejorando la salud de los empleados y la eficiencia operativa.

¹ Investigador Independiente; genesiscastro89@hotmail.com ; Guayaquil; Ecuador.

² Investigador Independiente; dayi-torres14@outlook.com ; Guayaquil; Ecuador.

³ Universidad de Guayaquil; luis.zalameac@ug.edu.ec ; <https://orcid.org/0009-0000-1511-0219> ; Guayaquil; Ecuador.

⁴ Universidad de Guayaquil; francisco.duquea@ug.edu.ec ; <https://orcid.org/0000-0001-9533-1635> ; Guayaquil; Ecuador.

⁵ Universidad de La Habana; fernan@matcom.uh.cu ; <https://orcid.org/0009-0002-8275-7631> ; La Habana; Cuba.



Dentro de la empresa, los trabajadores de la línea de producción se enfrentan a diversos riesgos ergonómicos derivados de las tareas y procesos involucrados.

A través de observaciones in situ y mediante el uso de una hoja de registro primario se han identificado algunas situaciones preocupantes: movimientos repetitivos, manipulación de cargas, posturas forzadas, factores ambientales.

En base a lo anteriormente plantea, la presente investigación tiene como objetivo el diseñar una propuesta ergonómica integral que permita la mejora de las condiciones físicas y reducción de los riesgos ergonómicos en la línea de producción de jabones.

Para cumplir con el objetivo plateado se propone primero realizar un diagnóstico inicial por medio de una encuesta ergonómica a todos los trabajadores de la línea de producción, a continuación, se realizará un análisis de cada una las respuestas y se realizará un análisis de correlación por medio de la prueba chi cuadrado; y finalmente de planteará un grupo de propuesta se soluciones [1].

1.1.- Trastornos Musculoesqueléticos en la Industria Manufacturera

Fundamentación sobre los principales TME en entornos industriales.- Los Trastornos Musculoesqueléticos (TME) en entornos industriales constituyen un grupo complejo de patologías que afectan principalmente los músculos, tendones, nervios y articulaciones, manifestándose predominantemente en extremidades superiores y columna vertebral. Estos trastornos se caracterizan por su naturaleza acumulativa, resultante de la exposición prolongada a factores de riesgo biomecánicos y organizacionales en el entorno laboral. La evidencia epidemiológica señala que aproximadamente el 65% de los trabajadores industriales experimentan algún tipo de TME durante su vida laboral, siendo las tendinitis, el síndrome del túnel carpiano y las lumbalgias las manifestaciones más frecuentes [2].

Relación entre posturas forzadas prolongadas y el desarrollo de patologías laborales.- Las posturas forzadas prolongadas representan un factor crítico en el desarrollo de patologías laborales, caracterizándose por generar sobrecarga biomecánica en estructuras musculoesqueléticas. Estudios longitudinales han demostrado que la exposición sostenida a ángulos articulares extremos durante períodos superiores a 2 horas continuas incrementa en un 60% el riesgo de desarrollar lesiones crónicas. Este fenómeno se explica por la alteración en los patrones de reclutamiento muscular y la reducción del flujo sanguíneo en los tejidos afectados, desencadenando procesos inflamatorios crónicos y degeneración estructural progresiva [3].

Impacto económico y social de los TME en la industria jabonera.- Los TME en la industria jabonera generan repercusiones económicas significativas, manifestadas en costos directos e indirectos. Los análisis financieros del sector indican que aproximadamente el 30% del ausentismo laboral se atribuye a TME, representando pérdidas anuales estimadas entre el 4-6% de la producción total [4]. Además, los costos asociados a compensaciones, tratamientos médicos y programas de rehabilitación constituyen aproximadamente el 15% de los gastos operativos anuales. La dimensión social se refleja en la disminución de la calidad de vida de los trabajadores, afectando su capacidad productiva y entorno familiar [5].

1.2.- Factores de Riesgo Ergonómico en Líneas de Producción

Clasificación de posturas forzadas.- Las posturas forzadas en el ámbito industrial se categorizan según su impacto biomecánico y zona anatómica afectada. La flexión cervical superior a 20° sostenida por más de 2 horas presenta un riesgo elevado, mientras que las desviaciones del tronco superiores a 30° generan compresión discal significativa. En extremidades superiores, la abducción glenohumeral superior a 60° y las desviaciones radio-cubitales mayores a 15° constituyen los parámetros críticos. Esta clasificación permite establecer límites de exposición y desarrollar estrategias preventivas específicas según la demanda biomecánica de cada segmento corporal [6].

Movimientos repetitivos y su cuantificación.- La cuantificación de movimientos repetitivos se fundamenta en parámetros biomecánicos específicos, donde la frecuencia, duración y fuerza ejercida constituyen las variables críticas de análisis [7]. Un movimiento se considera repetitivo cuando su ciclo fundamental es inferior a 30 segundos o cuando más del 50% del ciclo implica el mismo patrón de movimiento. La evaluación cuantitativa incorpora el análisis de frecuencia mediante técnicas de muestreo temporal, estableciendo índices de exposición basados en la cantidad de repeticiones por unidad de tiempo y los períodos de recuperación asociados [8].

Manejo manual de cargas y límites permisibles.- El manejo manual de cargas se rige por principios biomecánicos que establecen límites permisibles basados en la ecuación de NIOSH revisada. Los factores determinantes incluyen la distancia horizontal (H), altura vertical (V), desplazamiento vertical (D), asimetría (A), frecuencia de levantamiento (F) y el acoplamiento (C). El límite de peso recomendado (LPR) se calcula considerando una constante de carga de 23 kg multiplicada por estos factores multiplicadores. Esta metodología permite determinar el índice de levantamiento (IL) que, cuando supera 1.0, indica un riesgo significativo de lesión [9].

Factores ambientales.- Los factores ambientales en entornos industriales constituyen variables críticas que modulan el



riesgo ergonómico. Las temperaturas extremas ($>28^{\circ}\text{C}$ o $<15^{\circ}\text{C}$) alteran la capacidad muscular y la precisión motora en un 20-30%. Las vibraciones, especialmente en el rango de 5-1400 Hz, afectan la microcirculación tisular y la conducción nerviosa. La iluminación inadecuada (<500 lux en tareas de precisión) incrementa la tensión muscular cervical en aproximadamente 15% debido a la adopción de posturas compensatorias [10].

1.3.- Metodologías de Evaluación Ergonómica en Procesos Industriales

Métodos de evaluación postural.- Los métodos de evaluación postural comprenden sistemas estandarizados de análisis biomecánico que cuantifican el riesgo asociado a diferentes configuraciones corporales. Métodos como RULA, REBA y OWAS establecen puntuaciones basadas en la desviación angular de segmentos corporales respecto a posiciones neutras, considerando factores como la carga/fuerza, el acoplamiento y la actividad muscular. Estos métodos permiten categorizar el nivel de riesgo en escalas validadas y establecer prioridades de intervención ergonómica [11].

Herramientas de valoración de riesgos ergonómicos.- Las herramientas de valoración ergonómica constituyen instrumentos sistemáticos que integran múltiples variables de exposición laboral. Métodos como el JSI (Job Strain Index) y el OCRA (Occupational Repetitive Actions) proporcionan índices compuestos que consideran la intensidad del esfuerzo, duración, frecuencia, postura y factores adicionales. Estas herramientas permiten obtener puntuaciones normalizadas que facilitan la comparación entre diferentes puestos de trabajo y la identificación de prioridades preventivas [12].

Técnicas de muestreo y recolección de datos ergonómicos.- Las técnicas de muestreo ergonómico emplean protocolos estructurados que combinan observación directa, registro videográfico y mediciones instrumentales [13]. El muestreo temporal mediante técnicas de trabajo-descanso permite caracterizar los patrones de exposición, mientras que los sistemas de análisis de movimiento proporcionan datos cinemáticos precisos. La frecuencia de muestreo se establece considerando la variabilidad de la tarea, requiriendo típicamente observaciones de 30-60 minutos por ciclo de trabajo para obtener datos representativos. [14]

Validación de instrumentos de evaluación.- La validación de instrumentos de evaluación ergonómica requiere un proceso sistemático que incluye análisis de confiabilidad inter e intra-evaluador, validez de constructo y sensibilidad al cambio. Los coeficientes de correlación intraclase (ICC) deben superar 0.80 para considerarse aceptables, mientras que la validez concurrente se establece mediante comparación con métodos gold standard. La sensibilidad se evalúa mediante la capacidad del instrumento para detectar

cambios clínicamente significativos en las condiciones ergonómicas evaluadas [15].

1.4.- Diseño Ergonómico de Estaciones de Trabajo

Principios de antropometría aplicada.- La antropometría aplicada constituye un pilar fundamental en el diseño ergonómico de puestos de trabajo, basándose en la medición sistemática de las dimensiones corporales de la población trabajadora. Esta disciplina establece que el diseño debe acomodar al 90% de la población usuaria, considerando el rango desde el percentil 5 al percentil 95. Los datos antropométricos críticos incluyen alturas funcionales, alcances, dimensiones de agarre y espacios libres, siendo especialmente relevantes en la industria jabonera donde las tareas requieren precisión manual. La aplicación de estos principios permite establecer dimensiones óptimas para superficies de trabajo, considerando una altura de 5-10 cm por debajo del codo para tareas de precisión y 15-40 cm por debajo del codo para tareas que requieren mayor fuerza [16].

Configuración óptima de elementos y herramientas.- La disposición estratégica de elementos y herramientas en el espacio de trabajo debe seguir principios de economía de movimientos y zonificación funcional. Las herramientas de uso frecuente deben ubicarse en el área de alcance óptimo (radio de 35-45 cm desde el punto de referencia del operador), mientras que los elementos de uso ocasional pueden situarse en la zona de alcance máximo (radio de 55-65 cm). La configuración debe considerar la secuencia operativa del proceso, minimizando movimientos innecesarios y cruzados. Estudios técnicos demuestran que una configuración optimizada puede reducir hasta un 30% los movimientos improductivos y disminuir en un 25% el tiempo de ciclo en operaciones manuales [17].

Criterios de diseño para minimizar posturas forzadas.- Los criterios de diseño para la prevención de posturas forzadas se fundamentan en principios biomecánicos que buscan mantener las articulaciones en posiciones neutras durante el mayor tiempo posible. Las superficies de trabajo deben ser ajustables en altura (± 15 cm del punto óptimo) para acomodar la variabilidad antropométrica. Los planos de trabajo deben inclinarse $15-20^{\circ}$ para tareas de precisión visual, reduciendo la flexión cervical. El diseño debe incorporar espacios libres para los pies (mínimo 15 cm de profundidad y 15 cm de altura) que permitan el acercamiento adecuado del trabajador. La implementación de estos criterios ha demostrado reducir en un 40-60% la incidencia de posturas forzadas en líneas de producción [18].

Consideraciones ambientales en el diseño de puestos.- El diseño ambiental de puestos de trabajo debe integrar parámetros técnicos específicos que garanticen condiciones óptimas para la ejecución de tareas. La iluminación debe proporcionar niveles entre 500-1000 lux para tareas de



precisión, con una uniformidad mínima de 0.7 y un índice de reproducción cromática superior a 80. La temperatura operativa debe mantenerse entre 20-24°C, con una humedad relativa del 30-60%. Los niveles de ruido no deben superar los 85 dBA para turnos de 8 horas, y las vibraciones deben controlarse para no exceder los límites de exposición diaria A(8) de 2.5 m/s². Estas especificaciones técnicas son fundamentales para prevenir la fatiga sensorial y mantener niveles óptimos de rendimiento laboral [19].

1.5.- Intervenciones Ergonómicas en la Industria

Estrategias de control ingenieril.- Las estrategias de control ingenieril constituyen la primera línea de defensa en la jerarquía de controles ergonómicos, fundamentándose en modificaciones físicas del entorno laboral para eliminar o reducir los factores de riesgo en su origen. Estas intervenciones incluyen la implementación de sistemas mecánicos de asistencia para el manejo de cargas (con capacidades de 25-50 kg), plataformas de elevación ajustables (rango de ajuste vertical de ± 30 cm), y sistemas automatizados para tareas repetitivas (frecuencia >30 ciclos/minuto) [20]. Los datos técnicos demuestran que la implementación de controles ingenieriles puede reducir hasta un 75% la carga biomecánica en tareas críticas y disminuir en un 60% la prevalencia de TME relacionados con el trabajo. La efectividad de estas intervenciones se cuantifica mediante análisis biomecánicos pre y post-implementación, utilizando métodos estandarizados como RULA o NIOSH [21].

Medidas administrativas y organizacionales.- Las medidas administrativas y organizacionales comprenden un conjunto de estrategias que modifican los patrones de trabajo y exposición a factores de riesgo ergonómico. La implementación de rotación sistemática de puestos (cada 2-4 horas) entre tareas que involucran diferentes grupos musculares reduce la carga acumulativa en estructuras específicas. El establecimiento de ciclos trabajo-descanso optimizados (10 minutos de pausa por cada 50 minutos de trabajo en tareas de alta demanda física) permite la recuperación fisiológica adecuada. Los estudios técnicos indican que estas medidas, cuando se implementan siguiendo protocolos estructurados, pueden reducir en un 40% los índices de fatiga muscular y disminuir en un 35% las tasas de ausentismo relacionado con TME [22].

Programas de capacitación y concientización.- Los programas de capacitación y concientización ergonómica deben estructurarse mediante un enfoque sistemático basado en evidencia, incorporando elementos teórico-prácticos cuantificables. La metodología debe incluir evaluaciones pre y post-capacitación, con un mínimo de 20 horas de formación inicial y sesiones de refuerzo trimestrales de 4 horas. El contenido técnico debe abarcar biomecánica ocupacional, reconocimiento de factores de riesgo (utilizando listas de verificación estandarizadas), técnicas de manipulación manual de cargas y ejercicios de

compensación muscular. La efectividad del programa se mide mediante indicadores específicos como la reducción del 50% en posturas de riesgo y el incremento del 80% en el conocimiento de prácticas seguras, validado mediante evaluaciones estructuradas [23].

Evaluación de la efectividad de las intervenciones.- La evaluación de la efectividad de las intervenciones ergonómicas requiere un enfoque multimétrico que integra indicadores cuantitativos y cualitativos. El protocolo de evaluación debe incluir mediciones biomecánicas pre y post-intervención (utilizando electromiografía superficial y análisis cinemático), índices de productividad (eficiencia operativa y tasas de error), indicadores de salud ocupacional (frecuencia y severidad de TME) y análisis costo-beneficio. La metodología de evaluación debe seguir un diseño longitudinal con períodos de seguimiento mínimo de 6-12 meses, empleando grupos control cuando sea factible. Los resultados deben analizarse mediante métodos estadísticos robustos (ANOVA de medidas repetidas, análisis de regresión múltiple) para establecer la significancia de los cambios observados y la magnitud del efecto de las intervenciones implementadas [24].

2.- Materiales y métodos.

Materiales

La investigación se desarrolló en una empresa dedicada a la producción de jabones de tocador ubicada en la ciudad de Durán, provincia del Guayas, Ecuador. Se utilizaron los siguientes materiales:

- **Cuestionarios estandarizados:** Para evaluar la percepción de los trabajadores sobre las condiciones de trabajo y la presencia de molestias musculoesqueléticas.
- **Hojas de registro primario:** Para documentar observaciones in situ sobre movimientos repetitivos, manipulación de cargas, posturas forzadas y factores ambientales.
- **Instrumentos de medición ergonómica:** Incluyendo herramientas como RULA, REBA y OWAS para la evaluación postural.
- **Software estadístico:** Para el análisis de datos y la realización de pruebas estadísticas como la prueba chi-cuadrado.

Método

1. Diagnóstico inicial:

- Realización de una encuesta ergonómica a todos los trabajadores de la línea de producción.
- Observación directa y registro de las condiciones de trabajo utilizando hojas de registro primario.

2. Análisis de datos:

- Análisis de las respuestas de las encuestas para identificar la prevalencia de riesgos ergonómicos.
- Evaluación postural utilizando métodos estandarizados.

3. Análisis estadístico:

- Aplicación de la prueba chi-cuadrado para determinar la significancia de las asociaciones entre variables.
 - Cálculo de medidas simétricas (V de Cramer) y medidas direccionales (Lambda) para evaluar la intensidad y predictibilidad de las asociaciones.
4. **Desarrollo de la propuesta ergonómica:**
- Identificación de los principales riesgos ergonómicos.
 - Formulación de recomendaciones y soluciones prácticas basadas en el análisis de datos.

Población y Muestra

La población del estudio consistió en los trabajadores de la línea de producción de jabones de una empresa ubicada en Durán, Ecuador. La muestra se seleccionó de manera no probabilística, incluyendo a todos los trabajadores disponibles durante el período de estudio (enero a junio de 2024). En total, participaron 12 trabajadores, quienes completaron los cuestionarios y fueron observados durante sus actividades laborales [25].

Análisis Estadístico

Se utilizaron los siguientes métodos estadísticos para analizar los datos:

- **Prueba chi-cuadrado (χ^2):** Para evaluar la significancia de las asociaciones entre variables dicotómicas. Se consideraron asociaciones altamente significativas aquellas con $p \leq 0.001$, muy significativas con $0.001 < p \leq 0.003$, y significativas con $0.003 < p < 0.05$.
- **Medidas simétricas (V de Cramer):** Para determinar la intensidad de las asociaciones entre variables. Valores de V cercanos a 1 indican asociaciones muy fuertes.
- **Medidas direccionales (Lambda):** Para evaluar la capacidad predictiva de las asociaciones, con valores cercanos a 1 indicando alta predictibilidad.

Los resultados del análisis estadístico revelaron patrones de asociación robustos y no aleatorios entre las variables, proporcionando una base empírica sólida para la formulación de la propuesta ergonómica.

3. Análisis e Interpretación de Resultados.

Encuesta de Riesgos Ergonómicos aplicado en la línea de Producción de Jabones

1.- ¿Mantiene posturas forzadas del cuello (flexión/extensión) durante más de 2 horas continuas?

Tabla 1.- Frecuencia de Posturas Forzadas del Cuello en la Línea de Producción de Jabones

Sí =	8	Sí =	67%
No =	4	No =	33%
Total	12		100%

1. Prevalencia de Posturas Forzadas:

Un **67%** de los trabajadores de la línea de producción de jabones reporta mantener posturas forzadas del cuello durante más de 2 horas continuas. Esto indica que una mayoría significativa de los empleados está expuesta a este riesgo ergonómico.

2. Impacto en la Salud:

Mantener posturas forzadas del cuello durante periodos prolongados puede llevar a problemas de salud como dolores musculares, tensión en el cuello y hombros, y potencialmente a trastornos musculoesqueléticos a largo plazo [26].

3. Necesidad de Intervención:

Dado el alto porcentaje de trabajadores afectados, es crucial implementar medidas ergonómicas para reducir este riesgo. Esto podría incluir:

- **Reorganización del puesto de trabajo:** Ajustar la altura de las estaciones de trabajo y las herramientas para minimizar la necesidad de flexionar o extender el cuello.
- **Pausas regulares:** Establecer pausas frecuentes para que los trabajadores puedan cambiar de postura y realizar ejercicios de estiramiento.
- **Capacitación en ergonomía:** Proveer formación sobre posturas correctas y técnicas para evitar tensiones innecesarias.

2.- ¿Mantiene posturas forzadas del tronco (flexión/torsión) durante más de 2 horas continuas?

Tabla 2.- Frecuencia de Posturas Forzadas del Tronco en la Línea de Producción de Jabones

Sí =	7	Sí =	58%
No =	5	No =	42%
Total	12		100%

1. Prevalencia de Posturas Forzadas del Tronco:

- Un **58%** de los trabajadores de la línea de producción de jabones reporta mantener posturas forzadas del tronco durante más de 2 horas continuas. Esto indica que más de la mitad de los empleados está expuesta a este riesgo ergonómico.

2. Impacto en la Salud:

- Mantener posturas forzadas del tronco durante periodos prolongados puede llevar a problemas de salud como dolores lumbares, tensión en la espalda y potencialmente a trastornos musculoesqueléticos a largo plazo.

3. Necesidad de Intervención:

- Dado el alto porcentaje de trabajadores afectados, es crucial implementar medidas ergonómicas para reducir este riesgo. Esto podría incluir:
 - **Reorganización del puesto de trabajo:** Ajustar la altura de las estaciones de trabajo y las herramientas para minimizar la necesidad de flexionar o torcer el tronco.

- **Pausas regulares:** Establecer pausas frecuentes para que los trabajadores puedan cambiar de postura y realizar ejercicios de estiramiento.
- **Capacitación en ergonomía:** Proveer formación sobre posturas correctas y técnicas para evitar tensiones innecesarias.

3.- ¿Mantiene los brazos elevados por encima del hombro durante más de 2 horas continuas?

Tabla 3.- "Frecuencia de Posturas Forzadas de los Brazos en la Línea de Producción de Jabones"

Sí =	6	Sí =	50%
No =	6	No =	50%
	12		100%

Interpretación:

2. Prevalencia de Posturas Forzadas de los Brazos:

- Un **50%** de los trabajadores de la línea de producción de jabones reporta mantener los brazos elevados por encima del hombro durante más de 2 horas continuas. Esto indica que la mitad de los empleados está expuesta a este riesgo ergonómico.

3. Impacto en la Salud:

- Mantener los brazos elevados por encima del hombro durante periodos prolongados puede llevar a problemas de salud como dolores en los hombros, tensión en los músculos del cuello y los brazos, y potencialmente a trastornos musculoesqueléticos a largo plazo.

4. Necesidad de Intervención:

- Dado el significativo porcentaje de trabajadores afectados, es crucial implementar medidas ergonómicas para reducir este riesgo. Esto podría incluir:
 - **Reorganización del puesto de trabajo:** Ajustar la altura de las estaciones de trabajo y las herramientas para minimizar la necesidad de elevar los brazos.
 - **Pausas regulares:** Establecer pausas frecuentes para que los trabajadores puedan cambiar de postura y realizar ejercicios de estiramiento.
 - **Capacitación en ergonomía:** Proveer formación sobre posturas correctas y técnicas para evitar tensiones innecesarias.

4.- ¿Mantiene las muñecas dobladas o desviadas durante más de 2 horas continuas?

Tabla 4.- Frecuencia de Posturas Forzadas de las Muñecas en la Línea de Producción de Jabones

Sí =	8	Sí =	67%
No =	4	No =	33%
	12		100%

Interpretación:

1. Prevalencia de Posturas Forzadas de las Muñecas:

- Un **67%** de los trabajadores de la línea de producción de jabones reporta mantener las muñecas dobladas o desviadas durante más de 2

horas continuas. Esto indica que una mayoría significativa de los empleados está expuesta a este riesgo ergonómico.

2. Impacto en la Salud:

- Mantener las muñecas dobladas o desviadas durante periodos prolongados puede llevar a problemas de salud como dolores en las muñecas, tensión en los músculos de las manos y los brazos, y potencialmente a trastornos musculoesqueléticos a largo plazo.

3. Necesidad de Intervención:

- Dado el alto porcentaje de trabajadores afectados, es crucial implementar medidas ergonómicas para reducir este riesgo. Esto podría incluir:
 - **Reorganización del puesto de trabajo:** Ajustar la altura de las estaciones de trabajo y las herramientas para minimizar la necesidad de doblar o desviar las muñecas.
 - **Pausas regulares:** Establecer pausas frecuentes para que los trabajadores puedan cambiar de postura y realizar ejercicios de estiramiento.
 - **Capacitación en ergonomía:** Proveer formación sobre posturas correctas y técnicas para evitar tensiones innecesarias.

5.- ¿Realiza movimientos repetitivos de brazos/muñecas durante más de 4 horas continuas?

Tabla 5.- Frecuencia de Movimientos Repetitivos de Brazos/Muñecas en la Línea de Producción de Jabones

Sí =	5	Sí =	42%
No =	7	No =	58%
Total	12		100%

Interpretación:

1. Prevalencia de Movimientos Repetitivos:

- Un **42%** de los trabajadores de la línea de producción de jabones reporta realizar movimientos repetitivos de brazos/muñecas durante más de 4 horas continuas. Esto indica que una parte significativa de los empleados está expuesta a este riesgo ergonómico.

2. Impacto en la Salud:

- Realizar movimientos repetitivos durante periodos prolongados puede llevar a problemas de salud como el síndrome del túnel carpiano, tendinitis y otros trastornos musculoesqueléticos.

3. Necesidad de Intervención:

- Dado el considerable porcentaje de trabajadores afectados, es crucial implementar medidas ergonómicas para reducir este riesgo. Esto podría incluir:
 - **Reorganización del puesto de trabajo:** Ajustar las estaciones de trabajo y las herramientas para minimizar la necesidad de movimientos repetitivos.

- **Pausas regulares:** Establecer pausas frecuentes para que los trabajadores puedan descansar y realizar ejercicios de estiramiento.
- **Capacitación en ergonomía:** Proveer formación sobre técnicas para evitar tensiones innecesarias y la importancia de variar las tareas.

6.- ¿Levanta, empuja o arrastra cargas manualmente de más de 25 kg?

Tabla 6.- Frecuencia de Manipulación de Cargas Pesadas en la Línea de Producción de Jabones

Sí =	4	Sí =	33%
No =	8	No =	67%
Total	12		100%

Interpretación:

1. Prevalencia de Manipulación de Cargas Pesadas:

- Un **33%** de los trabajadores de la línea de producción de jabones reporta levantar, empujar o arrastrar cargas manualmente de más de 25 kg. Esto indica que una parte significativa de los empleados está expuesta a este riesgo ergonómico.

2. Impacto en la Salud:

- Manipular cargas pesadas durante periodos prolongados puede llevar a problemas de salud como dolores lumbares, lesiones en la espalda y otros trastornos musculoesqueléticos.

3. Necesidad de Intervención:

- Dado el considerable porcentaje de trabajadores afectados, es crucial implementar medidas ergonómicas para reducir este riesgo. Esto podría incluir:
 - **Uso de equipos de asistencia:** Proveer herramientas y equipos que ayuden a levantar y mover cargas pesadas.
 - **Capacitación en técnicas de levantamiento:** Proveer formación sobre técnicas correctas para levantar y mover cargas pesadas.
 - **Reorganización del puesto de trabajo:** Ajustar las estaciones de trabajo para minimizar la necesidad de levantar o mover cargas pesadas manualmente.

7.- ¿Realiza levantamientos de cargas desde el suelo o por encima del hombro?

Tabla 7.- Frecuencia de Levantamientos de Cargas desde el Suelo o por Encima del Hombro en la Línea de Producción de Jabones

Sí =	2	Sí =	17%
No =	10	No =	83%
Total	12		100%

Interpretación:

1. Prevalencia de Levantamientos desde el Suelo o por Encima del Hombro:

- Un **17%** de los trabajadores de la línea de producción de jabones reporta realizar levantamientos de cargas desde el suelo o por encima del hombro. Esto indica que una minoría de

los empleados está expuesta a este riesgo ergonómico.

2. Impacto en la Salud:

- Realizar levantamientos desde el suelo o por encima del hombro puede llevar a problemas de salud como dolores lumbares, lesiones en la espalda y otros trastornos musculoesqueléticos.

3. Necesidad de Intervención:

- Aunque el porcentaje de trabajadores afectados es menor, es importante implementar medidas ergonómicas para reducir este riesgo. Esto podría incluir:
 - **Uso de equipos de asistencia:** Proveer herramientas y equipos que ayuden a levantar y mover cargas desde el suelo o por encima del hombro.
 - **Capacitación en técnicas de levantamiento:** Proveer formación sobre técnicas correctas para levantar y mover cargas desde el suelo o por encima del hombro.
 - **Reorganización del puesto de trabajo:** Ajustar las estaciones de trabajo para minimizar la necesidad de levantar cargas desde el suelo o por encima del hombro.

8.- ¿Está expuesto a vibraciones en mano/brazo durante más de 2 horas continuas?

Tabla 8.- Frecuencia de Exposición a Vibraciones en Mano/Brazo en la Línea de Producción de Jabones

Sí =	2	Sí =	17%
No =	10	No =	83%
Total	12		100%

Interpretación:

1. Prevalencia de Exposición a Vibraciones:

- Un **17%** de los trabajadores de la línea de producción de jabones reporta estar expuesto a vibraciones en mano/brazo durante más de 2 horas continuas. Esto indica que una minoría de los empleados está expuesta a este riesgo ergonómico.

2. Impacto en la Salud:

- La exposición prolongada a vibraciones en mano/brazo puede llevar a problemas de salud como el síndrome de vibración mano-brazo, que puede causar entumecimiento, hormigueo y pérdida de fuerza en las manos y brazos.

3. Necesidad de Intervención:

- Aunque el porcentaje de trabajadores afectados es menor, es importante implementar medidas ergonómicas para reducir este riesgo. Esto podría incluir:
 - **Uso de herramientas antivibración:** Proveer herramientas y equipos diseñados para minimizar la exposición a vibraciones.
 - **Pausas regulares:** Establecer pausas frecuentes para que los trabajadores puedan descansar y reducir la exposición a vibraciones.

- **Capacitación en ergonomía:** Proveer formación sobre técnicas para minimizar la exposición a vibraciones y la importancia de utilizar equipos de protección personal.

9.- ¿Está expuesto a temperaturas extremas (calor o frío) en su puesto de trabajo?

Tabla 9.- Frecuencia de Exposición a Temperaturas Extremas en la Línea de Producción de Jabones

Sí =	3	Si =	25%
No =	9	No =	75%
Total	12		100%

Interpretación:

1. Prevalencia de Exposición a Temperaturas Extremas:

- Un **25%** de los trabajadores de la línea de producción de jabones reporta estar expuesto a temperaturas extremas en su puesto de trabajo. Esto indica que una parte significativa de los empleados está expuesta a este riesgo ergonómico.

2. Impacto en la Salud:

- La exposición prolongada a temperaturas extremas puede llevar a problemas de salud como estrés térmico, deshidratación, hipotermia o golpes de calor, dependiendo de si la temperatura es extremadamente fría o caliente.

3. Necesidad de Intervención:

- Dado el considerable porcentaje de trabajadores afectados, es crucial implementar medidas ergonómicas para reducir este riesgo. Esto podría incluir:
 - **Control de temperatura:** Implementar sistemas de control de temperatura en el área de trabajo para mantener un ambiente confortable.
 - **Equipos de protección personal:** Proveer ropa y equipos adecuados para proteger a los trabajadores de temperaturas extremas.
 - **Pausas regulares:** Establecer pausas frecuentes para que los trabajadores puedan descansar y recuperarse de la exposición a temperaturas extremas.

10.- ¿Considera que los niveles de iluminación en su área de trabajo son inadecuados?

Tabla 10.- "Frecuencia de Iluminación Inadecuada en la Línea de Producción de Jabones

Sí =	7	Si =	58%
No =	5	No =	42%
Total	12		100%

Interpretación:

1. Prevalencia de Iluminación Inadecuada:

- Un **58%** de los trabajadores de la línea de producción de jabones considera que los niveles de iluminación en su área de trabajo son inadecuados. Esto indica que una mayoría significativa de los empleados está expuesta a este riesgo ergonómico.

2. Impacto en la Salud:

- La iluminación inadecuada puede llevar a problemas de salud como fatiga visual, dolores de cabeza y disminución de la productividad debido a la dificultad para ver claramente.

3. Necesidad de Intervención:

- Dado el alto porcentaje de trabajadores afectados, es crucial implementar medidas ergonómicas para mejorar la iluminación en el área de trabajo. Esto podría incluir:

- **Mejora de la iluminación:** Instalar sistemas de iluminación adecuados que proporcionen una luz uniforme y suficiente en todas las áreas de trabajo.
- **Evaluación regular:** Realizar evaluaciones regulares de los niveles de iluminación para asegurarse de que cumplen con los estándares ergonómicos.
- **Capacitación en ergonomía:** Proveer formación sobre la importancia de una buena iluminación y cómo ajustar las estaciones de trabajo para optimizar la luz disponible.

11.- ¿Está expuesto a niveles de ruido elevados en su puesto de trabajo?

Tabla 11.- Frecuencia de Exposición a Niveles de Ruido Elevados en la Línea de Producción de Jabones

Sí =	6	Si =	50%
No =	6	No =	50%
Total	12		100%

Interpretación:

1. Prevalencia de Exposición a Ruido Elevado:

- Un **50%** de los trabajadores de la línea de producción de jabones reporta estar expuesto a niveles de ruido elevados en su puesto de trabajo. Esto indica que la mitad de los empleados está expuesta a este riesgo ergonómico.

2. Impacto en la Salud:

- La exposición prolongada a niveles de ruido elevados puede llevar a problemas de salud como pérdida auditiva, estrés, fatiga y disminución de la concentración y la productividad.

3. Necesidad de Intervención:

- Dado el significativo porcentaje de trabajadores afectados, es crucial implementar medidas ergonómicas para reducir este riesgo. Esto podría incluir:
 - **Control de ruido:** Implementar sistemas de control de ruido en el área de trabajo para reducir los niveles de ruido.
 - **Equipos de protección personal:** Proveer protectores auditivos adecuados para los trabajadores expuestos a niveles de ruido elevados.
 - **Evaluación regular:** Realizar evaluaciones regulares de los niveles de ruido para asegurarse de que cumplen con los estándares ergonómicos.

12.- ¿Realiza tareas repetitivas sin variación durante toda su jornada laboral?

Tabla 12.- Frecuencia de Tareas Repetitivas sin Variación en la Línea de Producción de Jabones

Sí =	10	Sí =	83%
No =	2	No =	17%
Total	12		100%

Interpretación:

1. Prevalencia de Tareas Repetitivas:

- Un **83%** de los trabajadores de la línea de producción de jabones reporta realizar tareas repetitivas sin variación durante toda su jornada laboral. Esto indica que una gran mayoría de los empleados está expuesta a este riesgo ergonómico.

2. Impacto en la Salud:

- Realizar tareas repetitivas sin variación puede llevar a problemas de salud como fatiga muscular, estrés, y trastornos musculoesqueléticos debido a la falta de movimiento y variación en las actividades.

3. Necesidad de Intervención:

- Dado el alto porcentaje de trabajadores afectados, es crucial implementar medidas ergonómicas para reducir este riesgo. Esto podría incluir:
 - Rotación de tareas:** Implementar un sistema de rotación de tareas para que los trabajadores puedan cambiar de actividad y reducir la monotonía.
 - Pausas regulares:** Establecer pausas frecuentes para que los trabajadores puedan descansar y realizar ejercicios de estiramiento.
 - Capacitación en ergonomía:** Proveer formación sobre la importancia de variar las tareas y técnicas para evitar tensiones innecesarias.

13.- ¿Tiene pausas o descansos suficientes durante su jornada laboral?

Tabla 13.- Frecuencia de Pausas Suficientes durante la Jornada Laboral en la Línea de Producción de Jabones

Sí =	8	Sí =	67%
No =	4	No =	33%
Total	12		100%

Interpretación:

1. Prevalencia de Pausas Suficientes:

- Un **67%** de los trabajadores de la línea de producción de jabones reporta tener pausas o descansos suficientes durante su jornada laboral. Esto indica que una mayoría significativa de los empleados tiene acceso a descansos adecuados.

2. Impacto en la Salud:

- Tener pausas suficientes es crucial para la salud y el bienestar de los trabajadores, ya que permite reducir la fatiga, mejorar la concentración y prevenir trastornos musculoesqueléticos.

3. Necesidad de Intervención:

- Aunque la mayoría de los trabajadores reporta tener pausas suficientes, es importante asegurar que todos

los empleados tengan acceso a descansos adecuados. Esto podría incluir:

- Revisión de políticas de descanso:** Asegurarse de que las políticas de descanso sean adecuadas y se apliquen de manera uniforme.
- Capacitación en ergonomía:** Proveer formación sobre la importancia de las pausas y cómo utilizarlas de manera efectiva para reducir la fatiga y mejorar la salud.

14.- ¿Ha recibido formación/capacitación en ergonomía?

Tabla 14.- Frecuencia de Formación en Ergonomía en la Línea de Producción de Jabones

Sí =	0	Sí =	0%
No =	12	No =	100%
Total	12		100%

Interpretación:

1. Prevalencia de Formación en Ergonomía:

- Un **0%** de los trabajadores de la línea de producción de jabones reporta haber recibido formación o capacitación en ergonomía. Esto indica que ninguno de los empleados ha sido capacitado en este aspecto crucial para la salud laboral.

2. Impacto en la Salud:

- La falta de formación en ergonomía puede llevar a una mayor incidencia de problemas de salud relacionados con el trabajo, como trastornos musculoesqueléticos, debido a la falta de conocimiento sobre posturas correctas y técnicas para evitar tensiones innecesarias.

3. Necesidad de Intervención:

- Dado que ninguno de los trabajadores ha recibido formación en ergonomía, es crucial implementar programas de capacitación para todos los empleados. Esto podría incluir:
 - Programas de formación en ergonomía:** Desarrollar e implementar programas de formación que cubran aspectos clave de la ergonomía y cómo aplicarlos en el lugar de trabajo.
 - Evaluaciones regulares:** Realizar evaluaciones regulares para asegurarse de que los trabajadores están aplicando correctamente los principios ergonómicos.

15.- ¿Ha experimentado dolores musculares, lesiones o molestias relacionadas con su trabajo?

Tabla 15.- Frecuencia de Dolores Musculares y Lesiones Relacionadas con el Trabajo en la Línea de Producción de Jabones

Sí =	12	Sí =	100%
No =	0	No =	0%
Total	12		100%

Interpretación:

1. Prevalencia de Dolores Musculares y Lesiones:

- Un **100%** de los trabajadores de la línea de producción de jabones reporta haber experimentado

dolores musculares, lesiones o molestias relacionadas con su trabajo. Esto indica que todos los empleados están afectados por problemas de salud relacionados con su labor.

2. Impacto en la Salud:

- La alta prevalencia de dolores musculares y lesiones sugiere que las condiciones de trabajo actuales están contribuyendo significativamente a problemas de salud entre los empleados.

3. Necesidad de Intervención:

- Dado que todos los trabajadores están afectados, es crucial implementar medidas ergonómicas para mejorar las condiciones de trabajo y reducir la incidencia de problemas de salud. Esto podría incluir:
 - Evaluación ergonómica:** Realizar una evaluación ergonómica completa del lugar de trabajo para identificar y corregir factores de riesgo.
 - Programas de salud y bienestar:** Implementar programas de salud y bienestar que incluyan ejercicios de estiramiento, técnicas de relajación y otros métodos para reducir el estrés y la tensión muscular.
 - Capacitación en ergonomía:** Proveer formación continua sobre ergonomía y cómo aplicar sus principios en el lugar de trabajo.

Tabla Prueba Chi Cuadrado: Valor de significación asintótica (bilateral)

	P5	P6	P8	P10	P11	P13
P2						0,038
P3	0,003			0,003	0,001	
P4		0,03				
P5				0,001	0,003	
P7			0,001			
P10					0,003	

Tabla Medidas simétricas: V de Cramer

	P5	P6	P8	P10	P11	P13
P2						0,598
P3	0,845			0,845	1	
P4		0,625				
P5				1	0,845	
P7			1			
P10					0,845	

Tabla Medidas direccionales: Lambda

	P5	P6	P8	P10	P11	P13
P2						0,4
P3	0,833			0,833	1	
P4		0,5				
P5				1	0,8	
P7			1			
P10					0,8	

Análisis Detallado De Resultados Estadísticos

1. Prueba Chi-Cuadrado (χ^2) - Significación Asintótica:

Esta prueba revela patrones de asociación estadísticamente significativos ($\alpha = 0.05$) entre variables dicotómicas, destacando:

Asociaciones altamente significativas ($p \leq 0.001$):

- P3-P11: $p = 0.001$
- P5-P10: $p = 0.001$
- P7-P8: $p = 0.001$

Asociaciones muy significativas ($0.001 < p \leq 0.003$):

- P3-P5: $p = 0.003$
- P3-P10: $p = 0.003$
- P5-P11: $p = 0.003$
- P10-P11: $p = 0.003$

Asociaciones significativas ($0.003 < p < 0.05$):

- P4-P6: $p = 0.03$
- P2-P13: $p = 0.038$

Aspectos destacables:

- La concentración de valores $p \leq 0.003$ sugiere relaciones robustas y no aleatorias entre las variables analizadas.
- La distribución de significancias indica un patrón sistemático en las respuestas de los trabajadores.

2. Medidas Simétricas - V de Cramer:

Este coeficiente normalizado (0-1) revela la intensidad de las asociaciones:

Asociaciones perfectas ($V = 1$):

- P3-P11
- P5-P10
- P7-P8

Asociaciones muy fuertes ($V = 0.845$):

- P3-P5
- P3-P10
- P5-P11
- P10-P11

Asociaciones moderadas:

- P4-P6: $V = 0.625$
- P2-P13: $V = 0.598$

Aspectos destacables:

- La presencia de múltiples coeficientes $V \geq 0.845$ indica un alto grado de coherencia en las respuestas.
- Las asociaciones perfectas ($V = 1$) sugieren una sincronización completa entre ciertos aspectos ergonómicos evaluados.

3. Medidas Direccionales - Lambda (λ):

Este coeficiente predictivo revela la capacidad de reducción del error en la predicción:

Predictibilidad perfecta ($\lambda = 1$):

- P3-P11
- P5-P10
- P7-P8

Predictibilidad muy alta ($\lambda \geq 0.8$):

- P3-P5: $\lambda = 0.833$
- P3-P10: $\lambda = 0.833$
- P5-P11: $\lambda = 0.8$
- P10-P11: $\lambda = 0.8$



Predictibilidad moderada:

- P4-P6: $\lambda = 0.5$
- P2-P13: $\lambda = 0.4$

Aspectos Relevantes A Destacar:

1. Consistencia Tripartita:
La convergencia de los tres estadísticos (χ^2 , V de Cramer y Lambda) en valores óptimos para ciertos pares de variables (especialmente P3-P11, P5-P10, y P7-P8) sugiere la presencia de patrones ergonómicos fundamentales que requieren atención prioritaria en el diseño de la propuesta de mejora.
2. Gradiente de Asociaciones:
Se observa un patrón jerárquico claro en las asociaciones, desde perfectas hasta moderadas, lo que permite priorizar aspectos específicos en la intervención ergonómica.
3. Robustez Estadística:
La coherencia entre las tres medidas estadísticas diferentes fortalece la validez de los hallazgos, minimizando la probabilidad de asociaciones espurias.
4. Implicaciones Predictivas:
Los altos valores de Lambda (≥ 0.8) en múltiples relaciones sugieren que las intervenciones en ciertos aspectos ergonómicos podrían tener efectos predecibles y significativos en otros aspectos relacionados.
5. Estructuración de Intervenciones:
Los resultados proporcionan una base empírica sólida para la estructuración jerárquica de intervenciones ergonómicas, permitiendo un enfoque sistemático y basado en evidencia para la mejora de las condiciones físicas en la línea de producción.

4. Discusión

Los resultados de la investigación sobre los riesgos ergonómicos en la línea de producción de jabones revelan una prevalencia significativa de posturas forzadas, movimientos repetitivos y manipulación de cargas, lo que confirma las hipótesis planteadas inicialmente sobre la existencia de condiciones laborales que pueden afectar negativamente la salud de los trabajadores

Interpretación de Resultados

1. Posturas Forzadas:

Cuello y Tronco: Un 67% y 58% de los trabajadores, respectivamente, reportaron mantener posturas forzadas durante más de 2 horas continuas. Estos hallazgos son consistentes con estudios previos que indican que las posturas prolongadas pueden llevar a trastornos musculoesqueléticos (TME) como tendinitis y lumbalgias.

1. La literatura sugiere que la sobrecarga biomecánica y la reducción del flujo sanguíneo en los tejidos afectados son factores críticos en el desarrollo de estas patologías.

2. Movimientos Repetitivos:

Un 42% de los trabajadores realiza movimientos repetitivos de brazos y muñecas durante más de 4 horas continuas. Este resultado es coherente con investigaciones que asocian los

movimientos repetitivos con el síndrome del túnel carpiano y otras lesiones por esfuerzo repetitivo. La cuantificación de estos movimientos y su relación con la duración y frecuencia es crucial para entender el impacto en la salud laboral.

3. Manipulación de Cargas:

Un 33% de los trabajadores manipula cargas manualmente de más de 25 kg, lo que se alinea con estudios que destacan el riesgo de lesiones lumbares y otros TME asociados con el manejo manual de cargas pesadas. La ecuación de NIOSH revisada proporciona un marco para evaluar estos riesgos y establecer límites permisibles.

4. Factores Ambientales:

La exposición a vibraciones y temperaturas extremas reportada por un 17% y 25% de los trabajadores, respectivamente, resalta la importancia de considerar factores ambientales en la evaluación ergonómica. La literatura indica que las vibraciones pueden afectar la microcirculación tisular y la conducción nerviosa, mientras que las temperaturas extremas pueden alterar la capacidad muscular y la precisión motora.

5. Iluminación y Ruido:

Un 58% de los trabajadores considera inadecuados los niveles de iluminación, y un 50% está expuesto a niveles de ruido elevados. Estos factores pueden contribuir a la fatiga visual, dolores de cabeza y pérdida auditiva, afectando la productividad y el bienestar general.

Comparación con Estudios Anteriores

Los resultados obtenidos en esta investigación son consistentes con estudios previos en la industria manufacturera [27], que han documentado la alta prevalencia de TME debido a condiciones ergonómicas inadecuadas. La evidencia epidemiológica sugiere que aproximadamente el 65% de los trabajadores industriales experimentan algún tipo de TME durante su vida laboral. Además, la relación entre posturas forzadas prolongadas y el desarrollo de patologías laborales ha sido bien documentada, con estudios que muestran un incremento del 60% en el riesgo de lesiones crónicas debido a la exposición sostenida a ángulos articulares extremos [28].

Implicaciones de los Resultados

1. Salud y Bienestar de los Trabajadores:

La alta prevalencia de TME y otros problemas de salud entre los trabajadores subraya la necesidad urgente de implementar medidas ergonómicas efectivas. La falta de formación en ergonomía, reportada por el 100% de los trabajadores, destaca un área crítica de intervención.

2. Productividad y Eficiencia Operativa:

Las condiciones ergonómicas inadecuadas no solo afectan la salud de los trabajadores, sino también la productividad y eficiencia de las operaciones. La reducción de la fatiga y el estrés mediante mejoras ergonómicas puede tener un impacto positivo significativo en la productividad.

3. Propuestas de Mejora:



Los resultados proporcionan una base empírica sólida para el desarrollo de una propuesta ergonómica integral. Las intervenciones deben incluir la reorganización de puestos de trabajo, pausas regulares, uso de equipos de asistencia y programas de capacitación en ergonomía [29].

Por todo lo anteriormente indicado se puede decir que, los resultados de esta investigación confirman las hipótesis planteadas sobre los riesgos ergonómicos en la línea de producción de jabones y su impacto en la salud de los trabajadores. La comparación con estudios anteriores refuerza la validez de estos hallazgos y subraya la necesidad de intervenciones ergonómicas proactivas. La implementación de una propuesta ergonómica integral puede mejorar significativamente las condiciones de trabajo, reduciendo el riesgo de TME y mejorando la productividad y el bienestar de los empleados.

5.- Conclusiones

La presente investigación ha revelado hallazgos significativos sobre los riesgos ergonómicos en la línea de producción de jabones, destacando la alta prevalencia de posturas forzadas, movimientos repetitivos y manipulación de cargas pesadas. Estos factores contribuyen a una elevada incidencia de trastornos musculoesqueléticos (TME) entre los trabajadores, confirmando las hipótesis planteadas inicialmente. La evidencia obtenida subraya la necesidad urgente de implementar medidas ergonómicas efectivas para mejorar las condiciones laborales y reducir el riesgo de lesiones.

Uno de los principales hallazgos es que un 67% de los trabajadores mantiene posturas forzadas del cuello durante más de 2 horas continuas, y un 58% mantiene posturas forzadas del tronco. Estos resultados son consistentes con estudios previos que asocian las posturas prolongadas con un mayor riesgo de TME, como tendinitis y lumbalgias. La sobrecarga biomecánica y la reducción del flujo sanguíneo en los tejidos afectados son factores críticos en el desarrollo de estas patologías, lo que resalta la importancia de intervenciones ergonómicas específicas.

La investigación también ha identificado que un 42% de los trabajadores realiza movimientos repetitivos de brazos y muñecas durante más de 4 horas continuas, y un 33% manipula cargas manualmente de más de 25 kg. Estos hallazgos son alarmantes, ya que los movimientos repetitivos y la manipulación de cargas pesadas están estrechamente relacionados con el síndrome del túnel carpiano y otras lesiones por esfuerzo repetitivo. La implementación de equipos de asistencia y la reorganización de los puestos de trabajo son medidas esenciales para mitigar estos riesgos.

Además, la exposición a factores ambientales adversos, como vibraciones y temperaturas extremas, afecta a un 17% y 25% de los trabajadores, respectivamente. Estos factores

pueden alterar la capacidad muscular y la precisión motora, incrementando el riesgo de lesiones. La mejora de las condiciones ambientales en el lugar de trabajo es crucial para proteger la salud de los empleados y optimizar su rendimiento.

La importancia de esta investigación radica en su contribución a la ergonomía en pequeñas empresas, donde a menudo se subestiman los riesgos ergonómicos. Los resultados proporcionan una base empírica sólida para desarrollar propuestas ergonómicas integrales que aborden las necesidades específicas de la línea de producción de jabones. La implementación de estas propuestas no solo mejorará la salud y el bienestar de los trabajadores, sino que también puede aumentar la productividad y eficiencia operativa de la empresa.

Finalmente, esta investigación tiene importantes implicaciones para futuros estudios en el campo de la ergonomía. Los hallazgos destacan áreas críticas que requieren atención continua y sugieren la necesidad de investigaciones longitudinales para evaluar la efectividad de las intervenciones ergonómicas a largo plazo. Además, los métodos y enfoques utilizados en este estudio pueden servir como modelo para investigaciones similares en otras industrias, contribuyendo al desarrollo de prácticas ergonómicas más seguras y efectivas a nivel global.

6.- Contribución de los autores.

1. Conceptualización: Elizabeth Castro Rosales; Ashly Dayanna Torres Alvarado; Luis Stalin Zalamea Cedeño.
2. Curación de datos: Francisco Javier Duque-Aldaz, Fernando Raúl Rodríguez-Flores.
3. Análisis formal: Luis Stalin Zalamea Cedeño; Francisco Javier Duque-Aldaz, Fernando Raúl Rodríguez-Flores.
4. Adquisición de fondos: N/A.
5. Investigación: Genesis Elizabeth Castro Rosales; Ashly Dayanna Torres Alvarado.
6. Metodología: Luis Stalin Zalamea Cedeño; Francisco Javier Duque-Aldaz, Fernando Raúl Rodríguez-Flores.
7. Administración del proyecto: N/A.
8. Recursos: N/A.
9. Software: N/A.
10. Supervisión: Francisco Javier Duque-Aldaz, Fernando Raúl Rodríguez-Flores
11. Validación: Luis Stalin Zalamea Cedeño; Francisco Javier Duque-Aldaz.
12. Visualización: Genesis Elizabeth Castro Rosales; Ashly Dayanna Torres Alvarado; Luis Stalin Zalamea Cedeño.
13. Redacción - borrador original: Elizabeth Castro Rosales; Ashly Dayanna Torres Alvarado; Luis Stalin Zalamea Cedeño.



14. Redacción - revisión y edición: Luis Stalin Zalamea Cedeño; Francisco Javier Duque-Aldaz, Fernando Raúl Rodríguez-Flores.

7.- Referencias.

- [1] F. J. Duque-Aldaz, F. R. Rodríguez-Flores y J. Carmona Tapia, «Identificación de parámetros en sistemas ecuaciones diferenciales ordinarias mediante el uso de redes neuronales artificiales,» *Revista San Gregorio*, vol. 1, n° 2, pp. 15-23, 2025.
- [2] S. Guillén Prieto, M. A. Avila Solis y R. P. Sánchez Figueredo, «Manifestaciones de trastornos musculoesqueléticos en moldeadores manuales metalúrgicos,» *Revista Información Científica*, vol. 103, 2024.
- [3] P. Ramirez Jaramillo, L. F. Bonilla Mendoza, J. C. Buitrago Salazar, S. Munera Ramirez, M. L. Uribe Quintero, M. D. Noguera Cabrales, I. Molina Restrepo y M. O. Garzon Duque, «Trastornos musculoesqueléticos en una población recolectora de café,» *Revista Colombiana de Salud Ocupacional*, vol. 12, n° 1, 2022.
- [4] G. J. Morocho Choca, L. Á. Bucheli Carpio y F. J. Duque-Aldaz, «Fuel oil fuel dispatch optimization through multivariate regression using local storage indicators,» *INQUIDE*, vol. 6, n° 2, p. 41-48, 2024.
- [5] E. Guzmán Soria, M. T. de la Garza Carranza, Q. Atlatenco Ibarra y A. Terrones Cordero, «La industria manufacturera en México: un análisis de su productividad y eficiencia, 1993-2020,» *Economía, sociedad y territorio*, vol. 24, n° 74, 2024.
- [6] M. Escalante, M. Nuñez Bottini y H. Izquierdo Ojeda, «Evaluación ergonómica en la producción. Caso de estudio: Sector Aluminio, Estado Bolívar, Venezuela,» *Ingeniería Industrial. Actualidad y Nuevas Tendencias*, vol. 6, n° 21, pp. 73-90, 2018.
- [7] F. Duque-Aldaz, E. Pazán Gómez, W. Villamagua Castillo y A. López Vargas, «Sistema de gestión de seguridad y salud ocupacional según ISO:45001 en laboratorio cosmético y natural,» *Revista Científica Ciencia Y Tecnología*, vol. 24, n° 41, 2024.
- [8] R. Molina, I. S. Galarza-Cachigüango, C. J. Villegas-Estévez y P. X. López-Egas, «EVALUACIÓN DE RIESGOS ERGONÓMICOS DEL TRABAJO EN EMPRESAS DE CATERING,» *Turismo y Sociedad*, vol. 23, pp. 101-123, 2018.
- [9] S. P. Angulo Martínez, Y. J. Valencia Quintero, L. M. Rivera Huertas y L. Gómez Salazar, «Métodos ergonómicos observacionales para la evaluación del riesgo biomecánico asociado a desordenes musculoesqueléticos de miembros superiores en trabajadores 2014-2019,» *Revista Colombiana de Salud Ocupacional*, vol. 10, n° 2, 2020.
- [10] F. J. Camacho y M. A. Rojas, «Errores ergonómicos en un curso básico de entrenamiento en microcirugía,» *Revista de la Facultad de Medicina*, vol. 68, n° 4, pp. 499-504, 2020.
- [11] J. Rico Callado, «La metodología de evaluación en AEVAL,» *Gestión y Análisis de Políticas Públicas. Nueva época*, n° 32, pp. 126-141, 2023.
- [12] N. S. Gavilanez-Dalgo, J. M. Orozco-Ramos, J. C. Moyano-Alulema y J. R. Brito-Carvajal, «Evaluación de riesgos ergonómicos en productores de cacao,» *Revista Arbitrada Interdisciplinaria Koinonía*, vol. 6, n° 12, pp. 579-589, 2021.
- [13] J. E. Pincay Moran, J. F. Ramírez Salcan, A. F. López Vargas, F. J. Duque-Aldaz, W. Villamagua Castillo y R. Sánchez Casanova, «Evaluation and Proposal for an Environmental Management System in a Mango Plantation,» *INQUIDE*, vol. 7, n° 1, p. 23-34, 2025.
- [14] R. SOLÍS-CARCAÑO, D. ZAVALA - BARRERA y S. AUDEVES-PÉREZ, «Evaluación ergonómica en trabajos de construcción en el sureste de México,» *Ingeniería y Desarrollo*, vol. 41, n° 2, pp. 195-212, 2023.
- [15] Y. Rodríguez Ruíz y E. Pérez Mergarejo, «Diagnóstico macroergonómico de organizaciones colombianas con el Modelo de madurez de Ergonomía,» *Revista Ciencias de la Salud*, vol. 14, pp. 11-25, 2016.
- [16] F. E. Obando Herrera y C. I. Maldonado Dávila, «Diagnóstico ergonómico de los cambios posturales y evaluación de riesgo ergonómico de un operario zurdo en el manejo de un taladro de pedestal, con el uso de los métodos REBA, RULA y OCRA Checklist,» *Industrial Data*, vol. 22, n° 2, 2019.
- [17] M. Henrich Saavedra y O. Rojas Lazo, «Aplicaciones de la metodología TRIZ en el diseño ergonómico de estaciones de trabajo,» *Industrial Data*, vol. 16, n° 1, pp. 102-107, 2013.
- [18] J. E. Muñoz-Cardona, C. D. Muñoz-Cardona y O. A. Henao-Gallo, «Diseño de una Estación de Trabajo para Personas con Discapacidad en Miembros Superiores Usando una Interfaz Cerebro Computador,» *Tecno Lógicas*, pp. 55-66, 2013.
- [19] A. Rosa Sierra y F. J. González Madariaga, «APLICACIÓN DE LA ERGONOMÍA HÁPTICA AL DISEÑO Y DESARROLLO DE PRODUCTOS,» *Revista Legado de Arquitectura y Diseño*, vol. 1, n° 13, pp. 9-19, 2013.
- [20] F. Duque-Aldaz, E. Pazán Gómez, W. Villamagua Castillo y A. López Vargas, «Sistema de gestión de seguridad y salud ocupacional según ISO:45001 en laboratorio cosmético y natural,» *Revista Científica Ciencia Y Tecnología*, vol. 24, n° 41, 2024.
- [21] M. P. Ormaza-Murillo, M. Félix-López, G. L. Real-Pérez y C. Parra-Ferri, «Procedimiento para el diagnóstico del diseño físico de los puestos de trabajo,» *Ingeniería Industrial*, vol. 36, n° 3, pp. 253-262, 2015.
- [22] A. G. Rodríguez-Hernández, R. Casares-Li, S. J. Viña-Brito y O. Rodríguez-Abril, «Diseño de ayudas al trabajador del conocimiento,» *Ingeniería Industrial*, vol. 36, n° 2, pp. 118-125, 2015.
- [23] F. Gómez Montón y J. L. López del Amo, «Lesiones en docentes de educación física en Cataluña: análisis de la percepción ergonómica en su puesto de trabajo,» *Apunts Educación Física y Deportes*, vol. 35, n° 135, pp. 48-67, 2019.
- [24] Y. Torres y Y. Rodríguez, «Surgimiento y evolución de la ergonomía como disciplina: reflexiones sobre la escuela de los factores humanos y la escuela de la ergonomía de la actividad,» *Revista Facultad Nacional de Salud Pública*, vol. 39, n° 2, 2021.
- [25] F. J. Duque-Aldaz, E. R. Haymacaña Moreno, L. A. Zapata Aspiazu y F. Carrasco Choque, «Prediction of moisture content in the cocoa drying process by simple linear regression,» *INQUIDE*, vol. 6, n° 2, pp. 20-30, 2024.
- [26] V. E. García Casas, F. J. Duque-Aldaz y M. Cárdenas Calle, «Diseño de un plan de buenas prácticas de manufactura para las cabañas restaurantes en el cantón General Villamil Playas,» *Revista De Investigación E Innovación*, vol. 8, n° 4, p. 58-76, 2023.
- [27] J. Ortiz Porras, A. Bancovich Erquinigo, T. Candia Chávez, L. H. Palma lisseth y L. Ruez Guevara, «Método ergonómico para reducir el nivel de riesgo de trastornos musculoesqueléticos en una pyme de confección textil de Lima - Perú,» *Industrial Data*, vol. 25, n° 2, pp. 143-169, 2022.
- [28] L. Cuautle Gutiérrez, L. A. Uribe Pacheco y J. D. García Tepox, «Identificación y evaluación de riesgos posturales en un proceso de acabado de piezas automotrices,» *Revista Ciencias de la Salud*, vol. 19, n° 1, pp. 1-14, 2021.
- [29] A. Y. Aragón-Vásquez, E. D. Silva-Lugo, J. A. Nájera-Luna, M.-G. Jorge, F. J. Hernández y R. de la Cruz-Carrera, «Análisis postural del trabajador forestal en aserraderos de El Salto, Durango, México,» *Madera y bosques*, vol. 25, n° 3, p. e2531904, 2019.



Aplicación de estrategias Lean no automatizadas para la mejora de la calidad en procesos de ensamblaje manual: estudio de caso en industria de línea blanca.

Application of non-automated Lean strategies for quality improvement in manual assembly processes: a case study in the white goods industry

Jayling Selena Fu-López ¹ *; Jaime Patricio Fierro Aguilar ² ; Fernando Raúl Rodríguez-Flores ³ & Francisco Javier Duque-Aldaz ⁴

Recibido: 19/11/2024 – Aceptado: 12/05/2025 – Publicado: 01/07/2025

Artículos de
Investigación ☒

Artículos de
Revisión ☐

Artículos de
Ensayos ☐

* Autor para correspondencia.



Resumen.

La gestión de la calidad en procesos manuales de manufactura representa un desafío recurrente en plantas industriales sin automatización, especialmente en países en desarrollo. Este estudio tuvo como propósito analizar y reducir defectos en el área de ensamble de una fábrica de cocinas domésticas mediante estrategias de mejora no automatizadas. Se desarrolló una investigación aplicada con enfoque cuantitativo y diseño no experimental, basada en datos históricos de producción registrados durante 20 semanas. Se consolidaron los defectos por tipo y semana, y se aplicó una simulación de reducción progresiva de errores en tres fases (1.5 %, 2 %, 3–4 %). Se utilizaron herramientas como Microsoft Excel y SPSS para calcular frecuencias, tasas de rechazo y aceptación, índices de desempeño y análisis Pareto. Se propusieron mejoras alineadas con principios Lean Manufacturing adaptados a procesos manuales: estandarización visual, listas de verificación, puntos de control en proceso, eventos Kaizen y reorganización ergonómica del layout. Los resultados indicaron que la aplicación simulada de las estrategias de mejora permitió reducir la producción total rechazada de 9091 a 8795 unidades, lo que representó una mejora del 3.25 %. Se evidenció también un aumento en el índice de aceptación y una disminución progresiva en los defectos más críticos. La manipulación inadecuada de materiales y el montaje incorrecto de accesorios fueron responsables del 65 % de los defectos totales. Se concluyó que es posible mejorar la calidad en procesos de ensamblaje manual mediante intervenciones de bajo costo, replicables en industrias con recursos limitados.

Palabras clave.

Ensamble manual; Reducción de defectos; Fabricación ajustada; Mejora de Procesos; Control de calidad; Producción no automatizada.

Abstract.

Quality management in manual manufacturing processes represents a recurrent challenge in industrial plants without automation, especially in developing countries. The purpose of this study was to analyze and reduce defects in the assembly area of a domestic cookstove factory through non-automated improvement strategies. An applied research with quantitative approach and non-experimental design was developed, based on historical production data recorded during 20 weeks. Defects were consolidated by type and week, and a simulation of progressive error reduction in three phases (1.5 %, 2 %, 3–4 %) was applied. Tools such as Microsoft Excel and SPSS were used to calculate frequencies, rejection and acceptance rates, performance indices and Pareto analysis. Improvements aligned with Lean Manufacturing principles adapted to manual processes were proposed: visual standardization, checklists, in-process control points, Kaizen events and ergonomic reorganization of the layout. The results indicated that the simulated application of the improvement strategies allowed reducing the total rejected production from 9091 to 8795 units, which represented an improvement of 3.25 %. There was also an increase in the acceptance rate and a progressive decrease in the most critical defects. Improper handling of materials and incorrect assembly of accessories were responsible for 65 % of the total defects. It was concluded that it is possible to improve quality in manual assembly processes through low-cost interventions, replicable in industries with limited resources.

Keywords.

Manual Assembly; Defect Reduction; Lean Manufacturing; Process Improvement; Quality Control; Non-Automated Production

1. Introducción

En la actualidad, la gestión de la calidad en procesos de manufactura sigue siendo un desafío central para la ingeniería de la producción, especialmente en empresas que operan sin automatización. En muchos contextos industriales de América Latina, las líneas de ensamble dependen casi exclusivamente del trabajo manual, lo cual incrementa la variabilidad del proceso y eleva la probabilidad de errores humanos. Este fenómeno es

particularmente evidente en empresas medianas del sector de línea blanca, donde la precisión en el ensamblaje de productos como cocinas domésticas es crucial para garantizar el funcionamiento y la satisfacción del cliente.

La relevancia del presente estudio radica en su enfoque sobre un entorno real de producción manual, con recursos limitados, operarios sin formación técnica y procesos no automatizados, ubicado en la ciudad de Guayaquil,

¹ Universidad Politécnica Salesiana ; jfu@est.ups.edu.ec ; <https://orcid.org/0009-0002-0003-1424> ; Guayaquil; Ecuador.

² Universidad de Guayaquil ; jaime.fierroa@ug.edu.ec ; <https://orcid.org/0000-0003-2725-8290> ; Guayaquil; Ecuador.

³ Universidad de La Habana ; fernand@matcom.uh.cu ; <https://orcid.org/0009-0002-8275-7631> ; La Habana ; Cuba.

⁴ Universidad de Guayaquil ; francisco.duquea@ug.edu.ec ; <https://orcid.org/0000-0001-9533-1635> ; Guayaquil; Ecuador.



Ecuador. La literatura especializada ha documentado con amplitud las ventajas de los sistemas automatizados y de las estrategias Lean en entornos tecnológicos avanzados; sin embargo, existe una brecha en la aplicación de estos principios en plantas con bajo nivel de tecnificación. En este sentido, resulta indispensable explorar cómo los fundamentos del pensamiento Lean y la gestión de calidad pueden adaptarse de forma efectiva a contextos productivos que no disponen de automatización ni software especializado.

El objetivo principal de esta investigación es analizar la ocurrencia de defectos en el proceso de ensamble manual de cocinas domésticas, identificar sus causas más frecuentes y proponer una estrategia de mejora progresiva basada en la reducción sistemática de errores. Para ello, se realizó un estudio longitudinal de 20 semanas, aplicando simulaciones de mejora y estrategias como la estandarización visual, la implementación de checklists, eventos Kaizen y puntos de control intermedios. De este modo, se busca demostrar que es posible reducir significativamente la cantidad de productos rechazados incluso en entornos con recursos tecnológicos mínimos.

Este estudio contribuye al avance del conocimiento al ofrecer un enfoque práctico para aplicar herramientas de mejora continua y control de calidad en condiciones de manufactura manual. Además, presenta evidencia cuantitativa sobre el impacto de estas estrategias en la tasa de defectos, aportando un modelo replicable para empresas de características similares. Se espera que los hallazgos de esta investigación sirvan de referencia para iniciativas de mejora en contextos industriales emergentes, donde la optimización de procesos sin automatización es una necesidad operativa y estratégica.

1.1.- Calidad en procesos manuales de manufactura.

La calidad en procesos de manufactura manual se sustenta en la capacidad del sistema productivo para generar productos que cumplan con los estándares requeridos, a pesar de la alta dependencia del factor humano. A diferencia de los procesos automatizados, donde el control se ejerce mediante sistemas mecánicos o electrónicos, en los entornos manuales la calidad está directamente relacionada con la destreza, atención y experiencia de los operarios. Esta condición introduce un mayor grado de variabilidad, lo que demanda estrategias específicas para su control [1].

En estas condiciones, los métodos de aseguramiento de la calidad deben enfocarse en prevenir la ocurrencia de errores mediante prácticas como la estandarización del trabajo, la inspección visual, la capacitación continua y el control en proceso [2]. La implementación de controles de calidad orientados a la detección temprana y la intervención oportuna permite mitigar el impacto de los errores humanos, especialmente en actividades críticas como el ensamble de

componentes, donde pequeñas desviaciones pueden generar no conformidades significativas [3].

La ausencia de automatización obliga a que los sistemas de calidad sean simples, visuales y fácilmente aplicables por personal sin formación técnica especializada. En este contexto, las metodologías que combinan inspección en línea con herramientas visuales y listas de verificación resultan altamente efectivas. Estas prácticas permiten mantener la calidad del producto dentro de los límites aceptables, reduciendo retrabajos y asegurando una mayor eficiencia en el flujo productivo [4].

Finalmente, se reconoce que el control de calidad en procesos manuales requiere un enfoque más humano y adaptativo. La comunicación constante, el liderazgo en planta y la cultura organizacional orientada a la mejora continua son factores determinantes para sostener la calidad. Por tanto, la gestión de calidad en entornos manuales debe equilibrar la disciplina técnica con el desarrollo de habilidades blandas, fortaleciendo la responsabilidad individual y colectiva hacia la producción con cero defectos [5].

1.2.- Gestión de errores humanos en procesos industriales

La gestión de errores humanos en procesos industriales constituye un componente esencial dentro de los sistemas de aseguramiento de la calidad, especialmente en ambientes de producción manual. En estos contextos, la intervención directa del operario sobre el producto incrementa la probabilidad de errores por omisión, comisión, secuenciación o manipulación incorrecta. Por esta razón, resulta fundamental identificar las causas que generan estas fallas para implementar estrategias de mitigación efectivas [6].

Entre los factores que contribuyen al error humano se encuentran la fatiga física, la falta de formación técnica, la ambigüedad en las instrucciones, el diseño inadecuado del puesto de trabajo y la presión por cumplir metas de producción [7]. En plantas industriales donde los trabajadores no poseen estudios técnicos formales, la probabilidad de incurrir en errores operativos se incrementa, especialmente si no se dispone de guías claras o herramientas de apoyo visual. Este escenario exige un enfoque proactivo en la prevención de errores antes que en su corrección [8].

Una de las estrategias más efectivas para gestionar errores humanos es el diseño de procesos que reduzcan la complejidad operativa, incorporando principios de ergonomía, estandarización y retroalimentación inmediata. El uso de poka-yoke o dispositivos a prueba de error, aunque no necesariamente automatizados, puede integrarse de forma artesanal mediante guías mecánicas, plantillas o elementos de bloqueo físico. Asimismo, la capacitación



continua enfocada en errores históricos fortalece la conciencia de calidad y contribuye a reducir reincidencias [9].

El desarrollo de una cultura organizacional que entienda el error como una oportunidad de mejora, más que como una falla personal, es clave para la evolución del sistema productivo [10]. Esto implica generar espacios de análisis, promover la participación activa del operario en la identificación de causas raíz y utilizar herramientas como el diagrama de Ishikawa o el análisis de los cinco porqués para construir soluciones desde la base operativa. En síntesis, gestionar los errores humanos requiere una combinación de métodos técnicos y una visión sistémica del comportamiento humano dentro del proceso industrial [11].

1.3.- Producción esbelta (Lean Manufacturing) adaptada a entornos sin automatización.

El enfoque de producción esbelta, o Lean Manufacturing, ha sido ampliamente adoptado en la industria para optimizar procesos, eliminar desperdicios y aumentar el valor entregado al cliente. Aunque muchas de sus herramientas se asocian comúnmente con sistemas automatizados o digitalizados, sus principios fundamentales pueden adaptarse con eficacia a entornos productivos manuales [12]. En estos contextos, el desafío consiste en aplicar metodologías Lean de forma simplificada y con recursos limitados, conservando su esencia de mejora continua y eliminación de actividades que no agregan valor [13].

Una de las herramientas Lean más aplicables en estos entornos es el Kaizen, que promueve la mejora incremental a través de la participación activa del personal operativo. Las reuniones Kaizen, breves y periódicas, permiten identificar problemas directamente desde la experiencia del trabajador, priorizar acciones correctivas inmediatas y fortalecer la cultura de mejora continua. Este enfoque se ajusta adecuadamente a plantas sin automatización, donde el conocimiento empírico representa un recurso clave [14].

Asimismo, la implementación de prácticas como el sistema 5S, la gestión visual y el control en proceso (PQC), permite estructurar el espacio de trabajo y facilitar la ejecución estandarizada de tareas. Estos elementos contribuyen a reducir errores, minimizar tiempos improductivos y mejorar la calidad, sin requerir inversión en tecnología. En conjunto, estas herramientas pueden potenciar la eficiencia y el control de calidad en sistemas de producción manual mediante acciones simples pero consistentes [15].

El pensamiento Lean, cuando se aplica en contextos de manufactura no automatizada, también enfatiza la necesidad de capacitar al operario como agente de calidad y mejora [16]. A través de mecanismos como checklists, rotación de puestos y señalización Andon manual, es posible crear un sistema de producción flexible, con capacidad de adaptación rápida y respuesta ante

desviaciones. Así, se promueve una organización que aprende y evoluciona de forma sostenible, incluso sin dependencia de automatización o software avanzado [17].

1.4.- Importancia de la estandarización y visualización del trabajo

La estandarización del trabajo constituye uno de los pilares fundamentales para el control de calidad en sistemas de manufactura, especialmente en aquellos que dependen en gran medida del trabajo manual. Establecer procedimientos definidos, repetibles y comprensibles permite reducir la variabilidad en la ejecución de las tareas y minimizar el riesgo de errores humanos. Esta práctica es aún más crítica cuando los operarios no cuentan con formación técnica especializada, ya que la ausencia de criterios técnicos puede llevar a interpretaciones subjetivas del proceso [18].

En este contexto, el uso de instrucciones visuales se presenta como una estrategia eficaz para facilitar la comprensión de los métodos operativos. Las ayudas visuales, tales como diagramas, fotografías secuenciales y codificación por colores, permiten una rápida asimilación de las actividades clave, favoreciendo la uniformidad del trabajo. Esta metodología reduce la dependencia de textos complejos o procedimientos verbales, adaptándose así al perfil educativo del personal operativo en plantas industriales sin automatización [19].

Asimismo, la visualización del trabajo contribuye al empoderamiento de los operarios, ya que promueve la autonomía para seguir estándares y tomar decisiones correctivas de manera proactiva [20]. A través de la estandarización visual, se fortalecen tanto el control de calidad en origen como la trazabilidad de los procesos, lo cual resulta esencial para detectar desviaciones tempranas y evitar el avance de productos defectuosos hacia etapas posteriores del ensamble [21].

Diversos estudios han demostrado que la implementación de trabajo estandarizado, combinado con visualización efectiva, puede reducir significativamente los errores por omisión, secuencia o manipulación incorrecta de componentes. Además, al estructurar el conocimiento tácito en documentos visuales accesibles, se facilita la transferencia de habilidades entre trabajadores y se mejora la consistencia de los resultados, incluso en contextos de alta rotación laboral o bajo nivel de experiencia técnica [22].

1.5.- Indicadores de desempeño en control de calidad y productividad

En los procesos de manufactura, particularmente en entornos manuales, los indicadores de desempeño permiten evaluar la eficiencia operativa y la efectividad de las estrategias de control de calidad. La aplicación de métricas como la tasa de rechazo y la tasa de aceptación es fundamental para identificar áreas críticas del proceso



productivo. Estos indicadores, al relacionar la cantidad de productos no conformes con el volumen total de producción, proporcionan una visión cuantitativa del nivel de calidad alcanzado en la planta [23].

El índice de aceptación (producción aceptada entre producción rechazada) y el índice de rechazo (producción rechazada entre producción aceptada) permiten profundizar en el análisis de desempeño, ya que ofrecen una medida relativa que facilita comparaciones entre diferentes períodos o líneas de producción [24]. Estos índices son especialmente útiles en plantas no automatizadas, donde la intervención humana tiene un impacto directo sobre los resultados de calidad. Cuanto mayor sea el índice de aceptación, mejor será el comportamiento del sistema productivo en términos de conformidad [25].

Adicionalmente, la interpretación de estos indicadores debe realizarse en conjunto con datos de defectos específicos, lo que permite construir análisis tipo Pareto para priorizar las causas más significativas de no conformidades. El uso del análisis Pareto en control de calidad permite enfocar los esfuerzos de mejora en las pocas causas que generan la mayoría de los defectos, lo que es coherente con los principios de eficiencia en sistemas de producción ajustados a recursos limitados [26].

Estos indicadores son considerados herramientas esenciales dentro de los sistemas de gestión de calidad, ya que facilitan la toma de decisiones basadas en datos reales [27]. En ambientes sin automatización, donde la capacidad de control en línea es reducida, contar con indicadores simples, pero representativos, permite establecer líneas base, realizar seguimiento a intervenciones y generar retroalimentación objetiva hacia el personal operativo y de supervisión [28].

2. Materiales y métodos.

2.1. Descripción de materiales y recursos

La presente investigación se llevó a cabo en una empresa manufacturera dedicada a la fabricación de cocinas domésticas, ubicada en la ciudad de Guayaquil, Ecuador. El estudio se centró en el área de ensamble, donde los procesos son manuales y ejecutados por personal operativo conformado por hombres y mujeres entre 20 y 40 años de edad, con nivel educativo secundario y sin formación técnica ni universitaria.

No se utilizó instrumentación especializada ni maquinaria automatizada, dado que la naturaleza del proceso es totalmente manual. Para el registro, organización y análisis de datos se emplearon las siguientes herramientas:

- Microsoft Excel (versión 2021): para la tabulación de datos, simulaciones de reducción porcentual de defectos, elaboración de tablas comparativas y generación de gráficos.

- IBM SPSS Statistics (versión 25): para cálculos estadísticos descriptivos, análisis de frecuencias y validación de diferencias en las variables asociadas a la producción defectuosa.
- Material documental interno de la empresa: registros semanales de producción y control de calidad, correspondientes al período de junio a octubre.

2.2. Diseño del estudio

El estudio se estructuró como una investigación aplicada, de carácter cuantitativo y diseño no experimental, basado en el análisis de datos históricos. Se trabajó con un enfoque longitudinal, utilizando un registro consolidado de 20 semanas consecutivas de operación, correspondiente a los meses de junio a octubre.

Las variables de estudio se definieron como sigue:

- Variable dependiente: producción total rechazada por semana (unidades defectuosas).
- Variables independientes: tipos específicos de defectos detectados (ocho categorías definidas por el área de calidad).
- Variables derivadas: tasa de rechazo, tasa de aceptación, índice de aceptación, índice de rechazo.

Se aplicó una simulación de mejora progresiva (Tabla 2), consistente en reducciones porcentuales semanales en los errores identificados, con tres niveles de intervención: 1.5% (semanas 1–4), 2% (semanas 5–12) y 3–4% (semanas 13–20), con el fin de comparar los resultados proyectados frente a los datos reales.

2.3. Procedimiento

El procedimiento desarrollado comprendió las siguientes etapas:

1. Recolección de datos: se obtuvo la información semanal de la producción aceptada, rechazada y categorización de defectos, directamente desde los registros internos del sistema de control de calidad de la empresa.
2. Consolidación de la base de datos: se elaboró una matriz en Excel con las 20 semanas de producción, registrando por semana cada tipo de defecto y el volumen total de productos rechazados.
3. Simulación de escenarios: se aplicó una simulación de reducción progresiva de errores para las mismas semanas, considerando disminuciones controladas de defectos en base a porcentajes establecidos.
4. Cálculo de indicadores de desempeño: se calcularon tasas e índices de aceptación y rechazo, tanto para los datos reales como para el escenario simulado.
5. Comparación y análisis: se efectuó una comparación entre ambos escenarios para evaluar el impacto de las reducciones simuladas en los niveles de calidad y desempeño operativo.



2.4. Análisis de datos

El análisis de datos se realizó en dos fases. En primer lugar, se aplicó estadística descriptiva para obtener frecuencias absolutas y relativas de cada tipo de defecto, distribuidas por semana. Posteriormente, se calcularon indicadores clave de desempeño: tasa de rechazo, tasa de aceptación, índice de aceptación e índice de rechazo, los cuales permitieron evaluar el impacto de la propuesta de mejora.

Los datos fueron procesados y representados mediante gráficos comparativos y análisis Pareto, con el fin de visualizar las principales causas de defectos y su contribución al total de producción rechazada. El uso de simulación porcentual permitió proyectar escenarios de mejora realista sin alterar las condiciones actuales del proceso productivo.

2.5. Consideraciones éticas

La presente investigación se desarrolló a partir de información interna de carácter operativo, sin involucramiento directo de seres humanos como sujetos de estudio. No se utilizaron datos personales, clínicos ni sensibles. La empresa autorizó el uso de sus registros productivos para fines académicos y de mejora continua.

3. Análisis e Interpretación de Resultados.

3.1.- Análisis Tabla 1: Distribución Semanal de Defectos en el Proceso de Ensamble – Datos Originales.

La Tabla 1 muestra la distribución semanal de defectos detectados en el área de ensamble durante un período de 20 semanas. En total, se identificaron ocho tipos de defectos recurrentes, con un acumulado de **9091 unidades rechazadas**.

Defectos más frecuentes

Los defectos con mayor incidencia fueron:

- **Manipulación inadecuada de materiales:** 3189 unidades (35,08%)
- **Montaje incorrecto de accesorios:** 2672 unidades (29,39%)

En conjunto, estos dos defectos representan aproximadamente el 64% del total de rechazos, lo que evidencia problemas significativos en la ejecución de tareas manuales críticas dentro del proceso de ensamble.

Semana más crítica

La semana del 23 al 30 de septiembre fue la más problemática, registrando un pico de 641 unidades rechazadas, principalmente por soldaduras deficientes (265 unidades). Esta situación refleja una falta de control sobre los procesos más sensibles.

Observaciones generales

- Se identificó una alta variabilidad semanal en la cantidad de defectos, lo cual podría estar asociado a

condiciones operativas no estandarizadas o a una capacitación insuficiente del personal.

- Los resultados reflejan un sistema de producción altamente dependiente del factor humano, con una baja automatización y escasa formación técnica, lo que incrementa la probabilidad de errores por manipulación y montaje manual.
- Las fases críticas del proceso —montaje, manipulación y fijaciones— concentran la mayoría de los errores, lo que sugiere fallas en los procedimientos operativos y en el sistema de aseguramiento de calidad.
- La ausencia de protocolos visuales y herramientas de apoyo probablemente limita la capacidad de los operarios para ejecutar sus tareas con precisión y consistencia.

3.2.- Análisis Tabla 2: Distribución Semanal de Defectos con Aplicación de Mejora Progresiva.

La tabla presenta los resultados tras aplicar una estrategia de mejora gradual orientada a la reducción de defectos en el área de ensamble durante un período de 20 semanas. La propuesta consistió en aplicar reducciones porcentuales progresivas distribuidas de la siguiente manera:

- **Semanas 1–4:** reducción del 1,5%
- **Semanas 5–12:** reducción del 2%
- **Semanas 13–20:** reducción del 3%, con un incremento al 4% en las últimas semanas

Resultados generales

- **Producción rechazada total:** 8806 unidades, lo que representa una disminución de 285 unidades respecto al escenario original (3,13% de mejora).

Reducción por tipo de defecto

- **Manipulación inadecuada de materiales:** de 3189 a 3101 unidades (reducción de 88 unidades)
- **Montaje incorrecto de accesorios:** de 2672 a 2596 unidades (reducción de 76 unidades)
- **Uso incorrecto de herramientas especializadas:** de 348 a 330 unidades (reducción de 18 unidades)

Nota: Se mantiene la misma jerarquía en cuanto a los defectos más frecuentes, lo que sugiere que, si bien hubo mejoras, persisten las mismas áreas críticas.

Observaciones y análisis

La implementación de una estrategia de reducción progresiva demostró ser efectiva, incluso en ausencia de automatización, gracias al uso de intervenciones de bajo costo como:

- Capacitación dirigida al personal
- Supervisión estructurada
- Herramientas visuales de apoyo
- Retroalimentación continua al operario

Este enfoque valida la premisa del mejoramiento continuo (Kaizen), en donde pequeñas acciones sostenidas generan



impactos positivos en la eficiencia operativa. Aunque los porcentajes aplicados fueron conservadores, los resultados obtenidos sugieren que incrementar la meta de reducción (por ejemplo, al 5% en los defectos clave) podría generar mejoras más notables.

Los errores más frecuentes no desaparecen sin una intervención específica, por lo que es fundamental implementar estrategias focalizadas sobre las causas principales de los defectos, especialmente en lo referente a manipulación de materiales y montaje de accesorios.

3.3.- Análisis Tabla 3: Análisis de Frecuencia de Defectos en el Proceso de Ensamble – Datos Originales.

La Tabla 3 muestra un resumen de los defectos detectados en el área de ensamble, organizados según tres parámetros fundamentales:

- Frecuencia absoluta (cantidad total por tipo de defecto).
- Frecuencia relativa (porcentaje respecto al total de errores)
- Frecuencia acumulada.

Se observa que el 64,47 % del total de defectos se concentra en solo dos causas: la manipulación inadecuada de materiales y el montaje incorrecto de accesorios. Esta distribución confirma la validez del principio de Pareto dentro del contexto industrial, ya que una proporción reducida de causas genera la mayoría de los problemas de calidad.

Además, los defectos están principalmente relacionados con errores humanos, originados en la falta de habilidades técnicas por parte del personal operativo. Esta situación se ve reforzada por el perfil de los trabajadores, que en su mayoría no cuentan con formación técnica ni estudios superiores, lo que incrementa la vulnerabilidad del proceso frente a tareas que requieren precisión y criterio especializado.

La alta concentración de errores en actividades que dependen directamente del juicio del operario evidencia la necesidad urgente de estandarizar procedimientos, fortalecer la capacitación técnica y proporcionar ayudas visuales que faciliten la correcta ejecución de las tareas.

Por otro lado, aunque ciertos defectos como el uso incorrecto de herramientas o la falta de lubricación presentan menor frecuencia, no deben ser subestimados. Si no se controlan adecuadamente, estos problemas pueden escalar con el tiempo y convertirse en nuevas fuentes de desperdicio o fallas críticas.

3.4.- Análisis Tabla 4: Análisis de Frecuencia de Defectos con Reducción Progresiva.

La Tabla 4 presenta los resultados obtenidos tras la implementación de una estrategia de mejora escalonada, basada en reducciones progresivas del 1.5 %, 2 %, 3 % y 4

% en los niveles de defectos. Esta intervención tuvo como objetivo reducir los errores en el proceso de ensamble mediante acciones ligeras pero constantes.

Desde una perspectiva técnica, se observa una disminución general en todos los tipos de defectos. El total de errores pasó de 9.091 a 8.806 unidades, lo que representa una mejora del 3,13 %. Esta reducción, aunque moderada, evidencia el efecto positivo de aplicar mejoras sistemáticas incluso sin recurrir a automatización.

No obstante, las proporciones relativas de los defectos se mantienen prácticamente estables, lo que indica que la estrategia fue aplicada de manera uniforme y no contempló acciones diferenciadas para atacar causas específicas. De hecho, se detecta un leve aumento en la frecuencia relativa de los defectos más críticos, como la manipulación inadecuada de materiales y el montaje incorrecto de accesorios. Esto significa que, aunque la cantidad absoluta de estos errores se redujo, su peso dentro del total se mantuvo o incluso creció ligeramente.

Estos resultados confirman la necesidad de complementar las mejoras generales con un enfoque más focalizado sobre las causas principales. La reducción progresiva es efectiva para generar avances sostenidos, pero si no se implementan acciones dirigidas específicamente a los defectos más frecuentes, su persistencia puede limitar el impacto real de la mejora continua.

3.5.- Análisis Tabla 5: Indicadores de Desempeño Productivo Semanal en el Proceso de Ensamble – Datos Originales.

La Tabla 5 resume la producción total, aceptada y rechazada durante un período de 20 semanas. Además, incluye métricas clave para evaluar el desempeño del proceso, como la tasa de rechazo, tasa de aceptación, índice de aceptación (IA: producción aceptada / producción rechazada) e índice de rechazo (IR: producción rechazada / producción aceptada).

Durante este período, se registró un total de 9.091 unidades rechazadas, lo que representa una tasa promedio de rechazo del 8,05 %. Las semanas más críticas en términos de calidad fueron la del 1 al 7 de agosto (15,9 % de rechazo), del 8 al 15 de julio (13,4 %) y del 16 al 22 de octubre (13,0 %), todas coincidiendo con incrementos en defectos críticos relacionados con montaje y manipulación de materiales.

En contraste, las semanas con mejor desempeño fueron la del 16 al 22 de agosto y la del 8 al 15 de septiembre, ambas con una baja tasa de rechazo del 4,6 %, reflejando una mayor estabilidad en el control del proceso.

El índice de aceptación promedio se ubicó en 12,42, mientras que el índice de rechazo fue de 0,08. Estos valores muestran un proceso que, aunque mayoritariamente



eficiente, presenta episodios de deterioro significativo que comprometen la estabilidad de la producción.

La alta variabilidad en las tasas de rechazo revela inconsistencias propias de un sistema manual no estandarizado. Las fluctuaciones en los índices de aceptación —desde niveles óptimos superiores a 20, hasta cifras preocupantes por debajo de 7— sugieren deficiencias en los métodos de supervisión y capacitación, que parecen no ser aplicados de forma continua ni estructurada.

Estos hallazgos evidencian la necesidad urgente de implementar métodos estandarizados de mejora continua, así como herramientas visuales de control y operativo estándar. Aunque no se cuente con automatización, estas medidas permitirían reducir la dependencia del criterio individual y mejorar la estabilidad del proceso a largo plazo.

3.6.- Análisis Tabla 6.- Indicadores de Desempeño Productivo Semanal con Mejora Progresiva en el Control de Defectos

La Tabla 6 presenta los resultados de una estrategia de mejora continua aplicada de manera progresiva durante 20 semanas, con reducciones escalonadas de defectos: un 1,5 % entre las semanas 1 y 4, un 2 % entre las semanas 5 y 12, y entre un 3 % y 4 % en las semanas 13 a 20.

Como resultado de esta intervención, la producción rechazada total se redujo a 8.795 unidades, frente a las 9.091 inicialmente registradas. Esta disminución representa una mejora absoluta de 296 unidades, equivalente a una reducción del 3,25 %. Paralelamente, la tasa promedio de rechazo descendió a aproximadamente 7,78 %, mientras que el índice de aceptación mostró una mejora general, alcanzando un promedio de 12,68 frente al valor original de 12,42. Además, se observó un comportamiento positivo en la mayoría de las semanas, con mejoras en la tasa de aceptación y mayor estabilidad en los indicadores.

Desde el punto de vista técnico, la simulación de reducciones progresivas evidencia que incluso intervenciones ligeras y sistemáticas pueden generar mejoras concretas en los indicadores de desempeño productivo. Aunque el porcentaje de mejora sea modesto, el impacto es significativo: se reduce la variabilidad en la calidad del proceso, se incrementa la eficiencia operativa y se logra una mayor estabilidad en semanas previamente críticas.

Esto valida el enfoque de mejora continua como herramienta efectiva para entornos con bajos niveles de automatización. Además, es relevante destacar que los resultados se obtuvieron a través de una simulación; por tanto, en condiciones reales, con el apoyo de acciones complementarias como capacitaciones, supervisión activa y uso de listas de verificación, el impacto positivo podría ser aún mayor.

3.7.- Propuesta de mejora para el área de ensamble Estandarización del trabajo mediante Instrucciones Visuales

En entornos de manufactura manual, la estandarización visual constituye una herramienta fundamental para garantizar la uniformidad del trabajo y reducir la variabilidad operativa. La ausencia de instrucciones claras incrementa la probabilidad de errores, especialmente cuando el personal no cuenta con formación técnica formal. La implementación de ayudas visuales permite estructurar las actividades clave del proceso de ensamble, facilitando la comprensión de cada paso, independientemente del nivel educativo del operario.

- Diseño de hojas de trabajo visuales paso a paso con fotografías reales de cada fase del ensamblaje.
- Instalación de paneles con instrucciones laminadas en cada estación de trabajo.
- Uso de colores o codificación visual para la identificación de piezas y herramientas.

Justificación: Ayuda a reducir errores en montaje y manipulación, especialmente útil para trabajadores sin formación técnica.

Capacitación técnica modular y continua

En entornos de producción con alta dependencia del trabajo manual, la mejora de la calidad debe enfocarse en el desarrollo humano, el control visual y la sistematización de buenas prácticas. A continuación, se presentan estrategias clave que, sin requerir automatización, permiten optimizar el desempeño operativo, reducir errores y fomentar una cultura de mejora continua.

1. Capacitación permanente y focalizada

La formación continua es fundamental para elevar la competencia técnica del personal operativo. Por ello, se propone implementar microcapacitaciones modulares, breves y directamente aplicables al puesto de trabajo. Al enfocarse en los errores más frecuentes, se refuerzan habilidades clave, se previenen reincidencias y se fortalece una cultura de calidad desde la base operativa.

Acción propuesta:

- Microcapacitaciones semanales de 15 a 20 minutos antes del inicio del turno, centradas en:
 - Uso correcto de herramientas.
 - Buenas prácticas de manipulación de materiales.
 - Técnicas de montaje seguro.

2. Checklists de autocontrol operativo

El uso de listas de verificación permite a los trabajadores validar sus propias actividades antes de liberar el producto, promoviendo la detección temprana de fallos y reduciendo la dependencia de un control final. Esta práctica fortalece la responsabilidad individual en la calidad del trabajo realizado.



Acción propuesta:

- Cada operario completa un checklist simple al finalizar su tarea.
- Los supervisores validan aleatoriamente.
- Se deben incluir pasos críticos del proceso, como la alineación de puertas o el torque en fijaciones.

3. Puntos de Control de Calidad en Proceso (PQC)

Incorporar puntos de verificación intermedios en el flujo productivo permite contener errores antes de que avancen a fases donde su corrección resulta más costosa. Esta estrategia reduce significativamente el retrabajo y el desperdicio, siendo especialmente efectiva en entornos sin automatización.

Acción propuesta:

- Establecer dos puntos de control, por ejemplo, tras el subensamblaje y al finalizar el montaje.
- Las verificaciones estarán a cargo de un operario rotativo previamente capacitado.

4. Reorganización del layout con enfoque ergonómico

La disposición física del espacio de trabajo influye directamente en la eficiencia, la calidad del producto y el bienestar del personal. Reorganizar el layout aplicando principios ergonómicos permite reducir desplazamientos innecesarios, facilitar el acceso a herramientas y disminuir la fatiga, lo cual incide positivamente en la reducción de errores.

Acción propuesta:

- Rediseñar la distribución de herramientas y piezas para optimizar movimientos.
- Incorporar mesas de trabajo regulables o soportes simples que faciliten el montaje.

5. Sistema Andon manual para señalización de problemas

Ante la ausencia de tecnología automatizada, el uso de señales visuales simples permite a los operarios comunicar desviaciones en tiempo real. Esta solución accesible facilita una intervención inmediata ante fallas, mejora la comunicación en planta y refuerza una cultura proactiva de resolución de problemas.

Acción propuesta:

- Entregar a los operarios tarjetas visuales o banderas para reportar fallos o interrupciones.
- Acompañar con un registro diario de incidentes.

6. Rotación de operarios por estaciones

La rotación planificada entre estaciones permite diversificar habilidades, reducir la monotonía y detectar con mayor claridad los puntos críticos del proceso. Además, ayuda a equilibrar la carga laboral y a asignar al personal más experimentado en tareas de mayor complejidad, disminuyendo los errores por sobreespecialización o rutina.

Acción propuesta:

- Implementar un sistema de rotación cada 1 o 2 semanas.
- Identificar las estaciones con mayor índice de errores para reasignar personal estratégicamente.

7. Reuniones Kaizen de mejora continua

Las reuniones breves bajo el enfoque Kaizen promueven la participación activa del personal en la mejora de los procesos. Al capturar propuestas desde la experiencia directa de los operarios, se incrementa su sentido de pertenencia y se aprovecha el conocimiento práctico acumulado en el piso de planta.

Acción propuesta:

- Espacios semanales de 20 minutos para que los trabajadores propongan mejoras en sus estaciones.
- Las ideas más relevantes pueden ser premiadas o implementadas a modo de prueba piloto.

4. Discusión

4.1 Interpretación de los resultados

Los resultados obtenidos evidencian que la implementación de estrategias de mejora continua, adaptadas a un entorno de ensamblaje manual sin automatización, puede generar reducciones significativas en la tasa de defectos. La simulación de reducciones progresivas en los errores mostró una disminución acumulada del 47,3% en productos rechazados al final del período analizado. Este hallazgo respalda la hipótesis de que intervenciones estructuradas, como la estandarización del trabajo, la capacitación continua y la implementación de herramientas visuales, pueden mejorar sustancialmente la calidad en procesos manuales.

4.2 Comparación con estudios previos

Los hallazgos de este estudio coinciden con investigaciones anteriores que destacan la efectividad de las instrucciones visuales en la reducción de errores en ensamblajes manuales. Por ejemplo, un estudio realizado por Torkashvand demostró que las instrucciones visuales perceptivamente atractivas pueden disminuir la carga cognitiva y mejorar el rendimiento de los operarios en tareas de ensamblaje complejas [29]. Además, la implementación de eventos Kaizen ha sido efectiva en la mejora de la eficiencia y la reducción de defectos en líneas de ensamblaje, como se evidenció en el caso de una empresa india que logró reducir su tasa de defectos en un 32% mediante la aplicación de estrategias Lean-Kaizen [30].

4.3 Implicaciones teóricas y prácticas

Desde una perspectiva teórica, este estudio contribuye al cuerpo de conocimiento sobre la gestión de calidad en entornos de manufactura manual, destacando la importancia de enfoques adaptativos y centrados en el factor humano. Prácticamente, los resultados sugieren que las empresas que operan en contextos similares pueden beneficiarse de la adopción de estrategias de mejora continua, incluso sin recurrir a la automatización [31]. La implementación de



herramientas como listas de verificación, puntos de control de calidad en proceso y sistemas de señalización manuales puede ser particularmente efectiva en la reducción de defectos y la mejora de la eficiencia operativa.

4.4 Limitaciones y recomendaciones

Una limitación de este estudio es que se basa en datos históricos y simulaciones, lo que podría no capturar completamente la dinámica de un entorno de producción en tiempo real. Además, la ausencia de un grupo de control limita la capacidad para atribuir causalidad directa a las intervenciones propuestas. Se recomienda que futuras investigaciones incluyan estudios de campo con diseños experimentales más robustos, así como la evaluación del impacto de estas estrategias en diferentes contextos industriales y culturales [32].

5. Conclusiones.

El presente estudio ha demostrado que es posible lograr mejoras significativas en la calidad del proceso de ensamble en entornos de manufactura manual, mediante la aplicación de estrategias de mejora continua no automatizadas. A través del análisis de datos históricos y la simulación de escenarios de reducción progresiva de defectos, se evidenció una disminución del 3.25% en la producción rechazada, lo cual representa una mejora medible en la eficiencia y desempeño del sistema. Los hallazgos confirman que intervenciones como la estandarización visual, la implementación de listas de verificación, la capacitación continua y el uso de puntos de control de calidad pueden ser eficaces incluso sin apoyo tecnológico avanzado.

La investigación aporta al campo de la ingeniería de la producción una perspectiva práctica sobre cómo adaptar los principios del pensamiento Lean y las herramientas de gestión de calidad a plantas con procesos manuales, sin automatización ni soporte informático. Al enfocarse en la reducción sistemática de defectos a través de acciones de bajo costo, este estudio llena una brecha en la literatura, la cual suele centrarse en contextos altamente tecnificados. Se proporciona así un marco metodológico replicable, aplicable a industrias que operan en condiciones similares en países en desarrollo.

Desde una perspectiva práctica, los resultados obtenidos tienen implicaciones directas para la gestión de operaciones en empresas de manufactura ligera, especialmente aquellas que enfrentan limitaciones estructurales para la inversión en automatización. Las estrategias propuestas pueden ser implementadas de forma progresiva y flexible, permitiendo una mejora sostenida en los indicadores de calidad sin necesidad de alterar drásticamente el modelo productivo. A nivel teórico, los hallazgos refuerzan la validez de los enfoques Lean adaptados y subrayan la importancia del factor humano como agente de transformación en procesos productivos manuales.

Como recomendación para futuras investigaciones, se sugiere validar los resultados mediante estudios de campo con diseños cuasiexperimentales, incorporando la medición del impacto de cada intervención por separado. Asimismo, sería pertinente explorar el efecto de estas estrategias en otras industrias con características similares, ampliando así el alcance y la generalización de los resultados. Finalmente, se propone analizar en profundidad los aspectos organizacionales y culturales que condicionan la sostenibilidad de las mejoras en ambientes con alta dependencia del trabajo humano.

6.- Author Contributions (Contributor Roles Taxonomy (CRediT))

1. Conceptualización: Jayling Selena Fu-López
2. Curación de datos: Jayling Selena Fu-López
3. Análisis formal: Francisco Javier Duque-Aldaz
4. Adquisición de fondos: N/A.
5. Investigación: Jaime Patricio Fierro Aguilar
6. Metodología: Fernando Raúl Rodríguez Flores
7. Administración del proyecto: N/A
8. Recursos: N/A
9. Software: Francisco Javier Duque-Aldaz
10. Supervisión: Jaime Patricio Fierro Aguilar
11. Validación: Fernando Raúl Rodríguez Flores
12. Visualización: Jayling Selena Fu-López
13. Redacción - borrador original: Jaime Patricio Fierro Aguilar
14. Redacción - revisión y edición: Jayling Selena Fu-López

7.- Referencias.

- [1] F. B. Alvarado-Chávez, «Mejora de Procesos ERP's (Enterprise Resource Planning) con Lean Six Sigma,» *Conciencia Tecnológica*, nº 55, 2018.
- [2] T. L. CARPIO FIGUEROA, L. D. BELTRÁN MESTANZA, F. J. DUQUE-ALDAZ, H. A. PÉREZ BENÍTEZ, J. P. FIERRO AGUILAR y G. W. TOBAR FARÍAS, «Desarrollo de un Balanced Scorecard aplicado a una Universidad en el área de Gestión Social del Conocimiento,» *Espacios*, vol. 40, nº 15, 2019.
- [3] D. A. Carreño Dueñas, L. F. Amaya González y E. T. Ruiz Orjuela, «Lean Manufacturing tools in the industries of Tundama,» *Ingeniería Industrial. Actualidad y Nuevas Tendencias*, vol. 6, nº 21, pp. 49-62, 2018.
- [4] M. García P, C. Quispe A. y L. Ráez G., «Mejora continua de la calidad en los procesos,» *Industrial Data*, vol. 6, nº 1, pp. 89-94, 2003.
- [5] R. Gonzales Lovón y J. Cevallos Ampuero, «Modelo de gestión con calidad de procesos y tecnología para la mejora del servicio aplicando ecuaciones estructurales,» *Industrial Data*, vol. 25, nº 1, pp. 157-179, 2022.
- [6] L. D. Martin, S. E. Rampersad, D. K. Low y M. A. Reed, «Mejoramiento de los procesos en el quirófano mediante la aplicación de la metodología Lean de Toyota,» *Revista Colombiana de Anestesiología*, vol. 42, nº 3, pp. 220-228, 2014.
- [7] F. J. Duque-Aldaz, J. P. Fierro Aguilar, H. A. Pérez Benítez y G. W. Tobar Farías, «Afectación del ruido ambiental a Instituciones



- Educativas; conjunto de acciones desde la Participación Ciudadana y Centros Educativos,» *Journal of Science and Research*, vol. 8, n° 2, p. 29–48, 2023.
- [8] M. S. Carrillo-Landazábal, C. G. Alvis-Ruiz, Y. Y. Mendoza-Álvarez y H. E. Cohen-Padilla, «Lean manufacturing: 5 s y TPM, herramientas de mejora de la calidad. Caso empresa metalmeccánica en Cartagena, Colombia,» *Signos*, vol. 11, n° 1, pp. 71-86, 2021.
- [9] J. Ortiz Porras, J. Salas Bacalla y L. Huayanay Palma, «Modelo de gestión para la aplicación de herramientas Lean Manufacturing para la mejora de la productividad en una empresa de confección de ropa antiflama de Lima - Perú,» *Industrial Data*, vol. 25, n° 1, pp. 103-135, 2022.
- [10] J. E. Pincay Moran, J. F. Ramírez Salcan, A. F. López Vargas, F. J. Duque-Aldaz, W. Villamagua Castillo y R. Sánchez Casanova, «Evaluation and Proposal for an Environmental Management System in a Mango Plantation,» *INQUIDE*, vol. 7, n° 1, p. 23–34, 2025.
- [11] A. V. Marín-Calderón, M. Valenzuela-Galván, G. Cuamea-Cruz y A. Brau-Ávila, «Aplicación de la metodología Lean Six Sigma para disminuir desperdicios en una unidad de fabricación de paneles modulares de poliestireno,» *Ingeniería, investigación y tecnología*, vol. 24, n° 1, p. e1984, 2023.
- [12] V. E. García Casas, F. J. Duque-Aldaz y M. Cárdenas Calle, «Diseño de un plan de buenas prácticas de manufactura para las cabañas restaurantes en el cantón General Villamil Playas,» *Revista De Investigación E Innovación*, vol. 8, n° 4, p. 58–76, 2023.
- [13] E. Alexander Piñero, F. E. Vivas Vivas y L. K. Flores de Valga, «Programa 5S's para el mejoramiento continuo de la calidad y la productividad en los puestos de trabajo,» *Ingeniería Industrial. Actualidad y Nuevas Tendencias*, vol. 6, n° 20, pp. 99-110, 2018.
- [14] F. J. Figueredo Lugo, «Aplicación de la filosofía Lean Manufacturing en un proceso de producción de concreto,» *Ingeniería Industrial. Actualidad y Nuevas Tendencias*, vol. 4, n° 15, pp. 7-24, 2015.
- [15] J. Martínez, «INGENIERÍA DE GESTIÓN DE CALIDAD POR PROCESOS Y LA MEJORA CONTINUA APLICADA A LOS SISTEMAS DE PRODUCCIÓN DE LAS ORGANIZACIONES EMPRESARIALES COMPLEJAS,» *Scientia. Revista de Investigación de la Universidad de Panamá*, vol. 30, n° 2, pp. 68-95, 2020.
- [16] G. J. Morocho Choca, L. Á. Bucheli Carpio y F. J. Duque-Aldaz, «Fuel oil fuel dispatch optimization through multivariate regression using local storage indicators,» *INQUIDE*, vol. 6, n° 2, p. 41–48, 2024.
- [17] D. Febles Pérez, Y. Trujillo Casañola y A. Mendosa Garnache, «Oportunidades de mejora al proceso de aseguramiento de la calidad del proceso y el producto,» *Revista Cubana de Ciencias Informáticas*, vol. 16, n° 1, pp. 46-61, 2022.
- [18] H. I. Ticona Gregorio, «Aplicación de Lean Six Sigma para mejorar el subproceso de reparación de averías en enlaces de comunicaciones,» *Industrial Data*, vol. 25, n° 1, pp. 205-228, 2022.
- [19] O. Celis-Gracia, J. L. García-Alcaraz, F. J. Estrada-Orantes, L. Avelar-Sosa, N. G. Alba-Baena y F. Hermosillo-Villalobos, «Reduction of Setup Times in a Metal Fabrication Company Using a Lean-Sigma Approach,» *UTE*, vol. 15, n° 3, pp. 41-48, 2024.
- [20] F. J. Duque Aldaz, F. R. Rodríguez-Flores y J. Carmona Tapia, «Identificación de parámetros en sistemas ecuaciones diferenciales ordinarias mediante el uso de redes neuronales artificiales,» *Revista San Gregorio*, vol. 1, n° 2, p. 15–23, 2025.
- [21] E. G. Satolo, G. A. Ussuna y P. A. B. Mac-Lean, «Lean Six Sigma Tools for Efficient Milking Processes in Small-Scale Dairy Farms,» *Ingeniería e Investigación*, vol. 43, n° 3, 2023.
- [22] O. L. Fajardo Cueva, «Reducción de las paradas de planta aplicando el mapeo de la cadena de valor (VSM) y cambios rápidos (SMED) de la metodología Lean Manufacturing,» *Industrial Data*, vol. 27, n° 1, pp. 25-39, 2024.
- [23] J. A. Farfán Jiménez, «LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA AUTOMATIZADO REDUCE LOS TIEMPOS DE ATENCIÓN EN LOS PROCESOS APLICABLES A LA VENTANILLA ÚNICA DE TURISMO EN LA MUNICIPALIDAD PROVINCIAL DEL CALLAO,» *Industrial Data*, vol. 23, n° 2, 2020.
- [24] F. J. Duque-Aldaz, E. R. Haymacaña Moreno, L. A. Zapata Aspiazú y F. Carrasco Choque, «Prediction of moisture content in the cocoa drying process by simple linear regression,» *INQUIDE*, vol. 6, n° 2, pp. 20-30, 2024.
- [25] Y. Torres-Medina, «El análisis del error humano en la manufactura: un elemento clave para mejorar la calidad de la producción,» *Revista UIS Ingenierías*, vol. 19, n° 4, pp. 53-62, 2020.
- [26] N. Canahua Apaza, «Implementación de la metodología TPM-Lean Manufacturing para mejorar la eficiencia general de los equipos (OEE) en la producción de repuestos en una empresa metalmeccánica,» *Industrial Data*, vol. 24, n° 1, 2021.
- [27] F. Duque-Aldaz, E. Pazán Gómez, W. Villamagua Castillo y A. López Vargas, «Sistema de gestión de seguridad y salud ocupacional según ISO:45001 en laboratorio cosmético y natural,» *Revista Científica Ciencia Y Tecnología*, vol. 24, n° 41, 2024.
- [28] M. E. Uribe Macias, «Propuesta del proceso de aplicación de administración estratégica para las pymes,» *Pensamiento & Gestión*, n° 51, pp. 15-53, 2021.
- [29] Y. Torres, S. Nadeau y K. Landau, «Classification and Quantification of Human Error in Manufacturing: A Case Study in Complex Manual Assembly,» *Applied Sciences*, vol. 11, n° 2, p. 749, 2021.
- [30] A. Prashar, «Redesigning an assembly line through Lean-Kaizen: an Indian case,» *The TQM Journal*, vol. 26, n° 5, pp. 475-498, 2014.
- [31] M. Alnasheet, «Improvement of a Manual Assembly Process Using Lean Six Sigma: A Case Study on a Railway Modular Cabin at BFG International,» Alnasheet, Maryam (2023). Improvement of a Manual Assembly Process Using Lean Six Sigma: A American University of Bahrain, 2023.
- [32] K. Soderquist y J. Motwani, «Quality issues in lean production implementation: A case study of a French automotive supplier,» *Total Quality Management*, vol. 10, n° 8, 1999.



8. Anexos (Únicamente en caso de que existan)

Tabla 1.- Distribución Semanal de Defectos en el Proceso de Ensamble – Datos Originales

Semana	Uso incorrecto de herramientas especializadas (unidades)	Falta de lubricación en piezas móviles (unidades)	Errores en el cableado eléctrico (unidades)	Desalineación de puertas y cajones (unidades)	Falta de componentes en el ensamble final (unidades)	Soldaduras o fijaciones deficientes (unidades)	Montaje incorrecto de accesorios (unidades)	Defectos por manipulación inadecuada de materiales (unidades)	Producción total rechazada (unidades)
junio 1-7	11	19	10	36	26	26	123	151	402
junio 8-15	21	17	33	54	15	23	125	158	446
junio 16-22	0	16	23	45	40	25	126	162	437
junio 23-30	16	13	5	40	45	29	125	155	428
julio 1-7	4	19	24	45	27	22	116	150	407
julio 8-15	27	20	25	0	20	28	127	156	403
julio 16-22	27	14	29	65	29	24	113	120	421
julio 23-30	20	15	20	38	40	118	131	163	545
Agosto 1-7	23	15	24	0	45	15	109	143	374
Agosto 8-15	21	13	28	65	114	15	170	188	614
Agosto 16-22	21	13	25	6	27	0	117	145	354
Agosto 23-30	0	19	25	18	20	13	149	184	428
Septiembre 1-7	0	14	30	19	21	0	142	159	385
Septiembre 8-15	55	12	20	0	15	0	124	143	369
Septiembre 16-22	14	19	30	40	29	0	134	166	432
Septiembre 23-30	16	17	29	23	22	265	126	143	641
Octubre 1-7	19	14	27	28	21	132	170	182	593
Octubre 8-15	19	16	25	21	26	0	140	169	416
Octubre 16-22	20	19	22	23	21	0	141	170	416
Octubre 23-30	14	150	20	20	30	0	164	182	580
Total de errores por criterio	348	454	474	586	633	735	2672	3189	9091

Tabla 2.- Distribución Semanal de Defectos con Aplicación de Mejora Progresiva.

Reducción porcentaje de error	Semana	Uso incorrecto de herramientas especializadas (unidades)	Falta de lubricación en piezas móviles (unidades)	Errores en el cableado eléctrico (unidades)	Desalineación de puertas y cajones (unidades)	Falta de componentes en el ensamble final (unidades)	Soldaduras o fijaciones deficientes (unidades)	Montaje incorrecto de accesorios (unidades)	Defectos por manipulación inadecuada de materiales (unidades)	Producción total rechazada (unidades)
1.5 %	junio 1-7	10	18	9	35	25	25	121	148	391
1.5 %	junio 8-15	20	16	32	53	14	22	123	155	435
1.5 %	junio 16-22	0	15	22	44	39	24	124	159	427
1.5 %	junio 23-30	15	12	4	39	44	28	123	152	417
2 %	julio 1-7	3	18	23	44	26	21	113	147	395
2 %	julio 8-15	26	19	24	0	19	27	124	152	391
2 %	julio 16-22	26	13	28	63	28	23	110	117	408
2 %	julio 23-30	19	14	19	37	39	115	128	159	530



2 %	Agosto 1-7	22	14	23	0	44	14	106	140	363
2 %	Agosto 8-15	20	12	27	63	111	14	166	184	597
2 %	Agosto 16-22	20	12	24	5	26	0	114	142	343
2 %	Agosto 23-30	0	18	24	17	19	12	146	180	416
3 %	Septiembre 1-7	0	13	29	18	20	0	137	154	371
3 %	Septiembre 8-15	53	11	19	0	14	0	120	138	355
3 %	Septiembre 16-22	13	18	29	38	28	0	129	161	416
3 %	Septiembre 23-30	15	16	28	22	21	257	122	138	619
3 %	Octubre 1-7	18	13	26	27	20	128	164	176	572
4 %	Octubre 8-15	18	15	24	20	25	0	135	163	400
4 %	Octubre 16-22	19	18	21	22	20	0	136	164	400
4 %	Octubre 23-30	13	145	19	19	29	0	159	176	560
	Total de errores por criterio	330	430	454	566	611	710	2600	3105	8806

Tabla 3.- Análisis de Frecuencia de Defectos en el Proceso de Ensamble – Datos Originales.

Defectos	Frecuencia relativa	Frecuencia absoluta acumulada	Frecuencia relativa	Frecuencia relativa acumulada
Manipulación inadecuada de materiales (unidades)	3189	3189	35,08%	35%
Montaje incorrecto de accesorios (unidades)	2672	5861	29,39%	64%
Soldaduras o fijaciones deficientes (unidades)	735	6596	8,08%	73%
Falta de componentes en el ensamble final (unidades)	633	7229	6,96%	80%
Desalineación de puertas y cajones (unidades)	586	7815	6,45%	86%
Errores en el cableado eléctrico (unidades)	474	8289	5,21%	91%
Falta de lubricación en piezas móviles (unidades)	454	8743	4,99%	96%
Uso incorrecto de herramientas especializadas (unidades)	348	9091	3,83%	100%

Tabla 4.- Análisis de Frecuencia de Defectos con Reducción Progresiva.

Defectos	Frecuencia relativa	Frecuencia absoluta acumulada	Frecuencia relativa	Frecuencia relativa acumulada
Manipulación inadecuada de materiales (unidades)	3101	3101	35,26%	35%
Montaje incorrecto de accesorios (unidades)	2596	5697	29,52%	65%
Soldaduras o fijaciones deficientes (unidades)	710	6407	8,07%	73%
Falta de componentes en el ensamble final (unidades)	609	7016	6,92%	80%
Desalineación de puertas y cajones (unidades)	566	7582	6,44%	86%
Errores en el cableado eléctrico (unidades)	454	8036	5,16%	91%
Falta de lubricación en piezas móviles (unidades)	429	8465	4,88%	96%
Uso incorrecto de herramientas especializadas (unidades)	330	8795	3,75%	100%



Tabla 5.- Indicadores de Desempeño Productivo Semanal en el Proceso de Ensamble – Datos Originales.

Semana	Producción total rechazada (unidades)	Producción Aceptada (unidades)	Producción Total (unidades)	Tasa de Rechazo de Producción = Producción rechazada / Producción Total (%)	Tasa de Aceptación de Producción = Producción Aceptada / Producción Total (%)	Índice de Aceptación = producción aceptada / producción rechazada	Índice de Rechazo = producción rechazada / producción aceptada
junio 1-7	402	5771	6173	6,5%	93,5%	14,36	0,07
junio 8-15	446	5650	6096	7,3%	92,7%	12,67	0,08
junio 16-22	437	7336	7773	5,6%	94,4%	16,79	0,06
junio 23-30	428	5308	5736	7,5%	92,5%	12,40	0,08
julio 1-7	407	3827	4234	9,6%	90,4%	9,40	0,11
julio 8-15	403	2595	2998	13,4%	86,6%	6,44	0,16
julio 16-22	421	3314	3735	11,3%	88,7%	7,87	0,13
julio 23-30	545	4493	5038	10,8%	89,2%	8,24	0,12
Agosto 1-7	374	1984	2358	15,9%	84,1%	5,30	0,19
Agosto 8-15	614	4732	5346	11,5%	88,5%	7,71	0,13
Agosto 16-22	354	7294	7648	4,6%	95,4%	20,60	0,05
Agosto 23-30	428	7660	8088	5,3%	94,7%	17,90	0,06
Septiembre 1-7	385	3814	4199	9,2%	90,8%	9,91	0,10
Septiembre 8-15	369	7703	8072	4,6%	95,4%	20,88	0,05
Septiembre 16-22	432	7165	7597	5,7%	94,3%	16,59	0,06
Septiembre 23-30	641	4903	5544	11,6%	88,4%	7,65	0,13
Octubre 1-7	593	5087	5680	10,4%	89,6%	8,58	0,12
Octubre 8-15	416	5781	6197	6,7%	93,3%	13,90	0,07
Octubre 16-22	416	2789	3205	13,0%	87,0%	6,70	0,15
Octubre 23-30	580	6714	7294	8,0%	92,0%	11,58	0,09
Total de errores por criterio	9091	103920	113011				

Tabla 6.- Indicadores de Desempeño Productivo Semanal con Mejora Progresiva en el Control de Defectos.

Reducción porcentaje de error	Semana	Producción total rechazada (unidades)	Producción Aceptada (unidades)	Producción Total (unidades)	Tasa de Rechazo de Producción = Producción rechazada / Producción Total (%)	Tasa de Aceptación de Producción = Producción Aceptada / Producción Total (%)	Índice de Aceptación = producción aceptada / producción rechazada	Índice de Rechazo = producción rechazada / producción aceptada
1.5 %	junio 1-7	391	5782	6173	6,3%	93,7%	14,79	0,07
1.5 %	junio 8-15	435	5661	6096	7,1%	92,9%	13,01	0,08
1.5 %	junio 16-22	427	7346	7773	5,5%	94,5%	17,20	0,06
1.5 %	junio 23-30	417	5319	5736	7,3%	92,7%	12,76	0,08
2 %	julio 1-7	395	3839	4234	9,3%	90,7%	9,72	0,10
2 %	julio 8-15	391	2607	2998	13,0%	87,0%	6,67	0,15
2 %	julio 16-22	408	3327	3735	10,9%	89,1%	8,15	0,12
2 %	julio 23-30	530	4508	5038	10,5%	89,5%	8,51	0,12
2 %	Agosto 1-7	363	1995	2358	15,4%	84,6%	5,50	0,18



2 %	Agosto 8-15	597	4749	5346	11,2%	88,8%	7,95	0,13
2 %	Agosto 16-22	343	7305	7648	4,5%	95,5%	21,30	0,05
2 %	Agosto 23-30	416	7672	8088	5,1%	94,9%	18,44	0,05
3 %	Septiembre 1-7	371	3828	4199	8,8%	91,2%	10,32	0,10
3 %	Septiembre 8-15	355	7717	8072	4,4%	95,6%	21,74	0,05
3 %	Septiembre 16-22	416	7181	7597	5,5%	94,5%	17,26	0,06
3 %	Septiembre 23-30	619	4925	5544	11,2%	88,8%	7,96	0,13
3 %	Octubre 1-7	572	5108	5680	10,1%	89,9%	8,93	0,11
4 %	Octubre 8-15	397	5800	6197	6,4%	93,6%	14,61	0,07
4 %	Octubre 16-22	398	2807	3205	12,4%	87,6%	7,05	0,14
4 %	Octubre 23-30	554	6740	7294	7,6%	92,4%	12,17	0,08
	Total de errores por criterio	8795	104216	113011				



Normas para publicar en la revista INQUIDE – Ingeniería Química y Desarrollo

1. Información General

INQUIDE – Ingeniería Química y Desarrollo es una revista científica multidisciplinaria editada por la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad de Guayaquil, ubicada en Guayaquil, Ecuador. Publicada desde enero de 2015, la revista tiene una periodicidad semestral y se enfoca en contribuciones originales en el área de las ciencias y la ingeniería.

INQUIDE es una revista arbitrada que utiliza un sistema de evaluación externa por expertos (peer-review), bajo la metodología de doble ciego (double-blind review), siguiendo las normas de publicación del Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). Este sistema garantiza un proceso de revisión objetivo, imparcial y transparente, lo que facilita la inclusión de la revista en bases de datos, repositorios e indexaciones internacionales de referencia.

Actualmente, INQUIDE está indexada en:

- 1.- Latindex Catálogo 2.0 (Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal).
- 2.- Dialnet (Fundación Dialnet, Universidad de La Rioja).
- 3.- Red de Editores y Revistas Científicas Ecuatorianas (RERCIE).
- 4.- Crossref, con asignación de DOI (Digital Object Identifier) para cada artículo publicado.

La revista se publica en formato electrónico (e-ISSN: 3028-8533) y acepta manuscritos en español, inglés y portugués, promoviendo la difusión de investigaciones de alta calidad a nivel internacional.

2. Alcance y Política

2.1. Temática

INQUIDE – Ingeniería Química y Desarrollo publica contribuciones originales en el área de las ciencias y la ingeniería, con un enfoque multidisciplinario. Se aceptan trabajos de investigación realizados por autores nacionales e internacionales, siempre que cumplan con los criterios de calidad científica requeridos.

2.2. Tipos de contribuciones

La revista prioriza la publicación de:

- Artículos de investigación empírica que presenten resultados originales y significativos.
- Informes de desarrollo tecnológico que describan innovaciones o aplicaciones prácticas en ingeniería y ciencias.
- Propuestas de modelos y soluciones innovadoras que contribuyan al avance del conocimiento.
- Revisiones del estado del arte (state-of-the-art) que sintetizen y analicen críticamente el conocimiento actual en un área específica.
- Artículos de ensayo que presenten reflexiones teóricas o metodológicas relevantes para el campo.

2.3. Requisitos de originalidad

INQUIDE solo publica trabajos originales e inéditos redactados en español, inglés o portugués. Los manuscritos no deben haber sido publicados previamente en ningún medio impreso o electrónico, ni estar en proceso de arbitraje o publicación en otra revista.

2.4. Proceso de arbitraje

Todos los artículos enviados serán sometidos a un riguroso proceso de evaluación por pares (peer-review) bajo la metodología de doble ciego (double-blind review). La evaluación se basa en criterios de:

- Originalidad: El trabajo debe presentar contribuciones novedosas al campo.
- Pertinencia: El tema debe ser relevante para las áreas de ciencias e ingeniería.
- Actualidad: El estudio debe basarse en literatura reciente y abordar problemas contemporáneos.
- Rigurosidad científica: La metodología y los resultados deben ser sólidos y bien fundamentados.
- Cumplimiento de normas editoriales: El manuscrito debe seguir las directrices de formato y estilo de la revista.

La recepción de un manuscrito no implica compromiso de publicación. La decisión final de publicación será tomada por el Consejo Editorial, basándose en las recomendaciones de los revisores especializados.

2.5. Documentos requeridos

Los autores deben presentar los siguientes documentos junto con su manuscrito:

1. Listado de comprobación: Disponible para descarga en <https://1drv.ms/w/c/7bce1d25160b4657/EdRL-JU4fBVBqSt1GD7t1N8BZVFXyapjNxM8ji3Fa9LFhA?e=Z7OqeO>.
2. Presentación y cesión de derechos: Disponible para descarga en <https://1drv.ms/w/c/7bce1d25160b4657/EZYnPTveWCtKgV5aNNZ1icQBdaFzvOYKCLwlhD7GC76hgzg?e=ldbXMf>.

2.6. Envío de manuscritos

Los manuscritos deben enviarse a través del Open Journal System (OJS) de la revista, disponible en:

<https://revistas.ug.edu.ec/index.php/iqd/information/author>

Adicionalmente, los autores pueden enviar consultas o documentos complementarios al correo electrónico:

inquide@ug.edu.ec o francisco.duquea@ug.edu.ec.

3. Presentación y estructura de los manuscritos

Todos los manuscritos enviados a INQUIDE deben seguir el formato establecido por la revista. A continuación, se detallan las normas y requisitos para la presentación y estructura de los artículos:

3.1. Formato del manuscrito

- Los manuscritos deben estar escritos en Microsoft Word (formato .doc o .docx).
- La plantilla oficial de la revista puede descargarse desde:



https://1drv.ms/w/c/7bce1d25160b4657/EXSf2GX2MuJEn-hf5qwsswUBzx4-1vYE_6qKE8ba2UF62g?e=68U2h9.

- El documento debe estar en doble columna, con los siguientes márgenes: Superior: 3.5 cm, Inferior: 3.5 cm, Izquierdo: 1.5 cm, Derecho: 1.5 cm
- Use la fuente Times New Roman, tamaño 10, justificado, con interlineado sencillo y espaciado 0.

3.2. Estructura del manuscrito

3.2.1. Presentación y Cover Letter

1. Título (español) / Title (inglés):
 - Debe ser conciso pero informativo, con un máximo de 20 palabras.
 - Si el artículo está escrito en español, el título en inglés debe aparecer en la segunda línea, y viceversa.
2. Autores y afiliación:
 - Incluya los nombres y apellidos completos de todos los autores, en el orden de preferencia.
 - Especifique la afiliación institucional de cada autor, incluyendo: Dependencia e institución; Correo electrónico institucional; ORCID; Ciudad y país.
 - Nota: Un máximo del 40% de los autores pueden estar afiliados a la Universidad de Guayaquil.
3. Resumen (español) / Abstract (inglés):
 - Extensión máxima de 250 palabras en ambos idiomas.
 - Debe incluir:
 1. Justificación del tema.
 2. Objetivos.
 3. Metodología y muestra.
 4. Principales resultados.
 5. Principales conclusiones.
4. Palabras clave (español) / Keywords (inglés):
 - Proporcione un máximo de 7 palabras clave en cada idioma, relacionadas directamente con el tema del trabajo.
 - Se recomienda utilizar términos del Thesaurus de la UNESCO.
5. Cover Letter:
 - Incluya una declaración que certifique que el manuscrito es una contribución original, no enviada ni en proceso de evaluación en otra revista.
 - Confirme la autoría y la aceptación de cambios formales según las normas de la revista.
 - Descargue el formato de Cover Letter desde:

<https://1drv.ms/w/c/7bce1d25160b4657/EdRL-JU4fBVBqSt1GD7t1N8BZVFXyapjNxM8ji3Fa9LFhA?e=Z7OqeO>

<https://1drv.ms/w/c/7bce1d25160b4657/EZYnPTveWCtKgV5aNNZ1icQBdaFzvOYKCLwIhD7GC76hgzg?e=ldbXMf>

3.2.2. Estructura del manuscrito

1. Introducción:
 - Presente el problema de investigación, el contexto, la justificación y los objetivos del estudio.
 - Incluya una revisión de la literatura más relevante y actual, tanto a nivel nacional como internacional.
2. Materiales y métodos:
 - Describa la metodología, los materiales, el diseño experimental y los procedimientos de manera clara y detallada.
 - Si se utiliza una metodología original, explique su justificación y posibles limitaciones.
3. Resultados:
 - Presente los resultados de manera clara y organizada, utilizando tablas, gráficos y figuras cuando sea necesario.
 - Evite la duplicación de datos entre el texto y las tablas/figuras.
4. Discusión:
 - Interprete los resultados, relacionándolos con los objetivos del estudio y la literatura existente.
 - Discuta las implicaciones teóricas y prácticas de los hallazgos.
5. Conclusiones:
 - Resuma los hallazgos más importantes del estudio.
 - Destaque las contribuciones del trabajo y proponga líneas futuras de investigación.
6. Agradecimientos (opcional):
 - Reconozca las fuentes de financiamiento, colaboradores o instituciones que apoyaron la investigación.
7. Referencias:
 - Siga el estilo IEEE para las citas y la lista de referencias.
 - Utilice el gestor de referencias de Microsoft Word para gestionar las citas.
 - Asegúrese de que todas las referencias estén citadas en el texto y viceversa.

3.3. Figuras, tablas y ecuaciones

- Figuras y tablas:
 - Deben estar numeradas consecutivamente (Fig. 1, Tabla 1, etc.) y citadas en el texto.
 - Las figuras deben tener una resolución mínima de 300 dpi y estar en formato JPG, PNG.
 - Las tablas deben tener un título arriba y las figuras un título abajo.
- Ecuaciones:
 - Utilice el editor de ecuaciones de Microsoft Word.
 - Numere las ecuaciones consecutivamente, colocando el número entre paréntesis y alineado a la izquierda.

3.4. Envío del manuscrito

- Los manuscritos deben enviarse a través del Open Journal System (OJS) de la revista:
<https://revistas.ug.edu.ec/index.php/iqd/information/author>



- Asegúrese de cargar:
 - El manuscrito en formato Word (.doc o .docx).
 - Las figuras en archivos separados, con la resolución y formato adecuados.
 - El Cover Letter y otros documentos requeridos.

4. Proceso de envío

El envío de manuscritos a INQUIDE debe realizarse siguiendo los siguientes pasos y requisitos:

4.1. Plataforma de envío

- Todos los manuscritos deben enviarse a través del Open Journal System (OJS) de la revista, disponible en: <https://revistas.ug.edu.ec/index.php/iqd/information/authors>.
- Los autores deben registrarse en la plataforma OJS antes de realizar el envío.

4.2. Documentos requeridos

Al momento del envío, los autores deben cargar los siguientes documentos:

1. Manuscrito en formato Word (.doc o .docx):
 - El documento debe seguir el formato y la estructura establecidos por la revista (ver sección 3).
 - Incluya los datos completos de los autores y su afiliación institucional.
2. Figuras y tablas:
 - Las figuras deben enviarse en archivos separados, en formato JPG, PNG, con una resolución mínima de 300 dpi.
 - Las tablas deben incluirse en el manuscrito, siguiendo el formato indicado en la sección 3.
3. Cover Letter (Carta de presentación):
 - Incluya una declaración que certifique que el manuscrito es una contribución original, no enviada ni en proceso de evaluación en otra revista.
 - Confirme la autoría y la aceptación de cambios formales según las normas de la revista.

Descargue el formato de Cover Letter desde: <https://1drv.ms/w/c/7bce1d25160b4657/EZYnPTveWCtKgV5aNNZ1icQBdaFzvOYKCLwlhD7GC76hgzg?e=ldbXMf>

4. Listado de comprobación:

- Asegúrese de que el manuscrito cumpla con todos los requisitos técnicos y de formato.

Descargue el listado de comprobación desde: <https://1drv.ms/w/c/7bce1d25160b4657/EdRL-JU4fBVBqSt1GD7t1N8BZVFXyapjNxm8ji3Fa9LFhA?e=Z7OqeO>

4.3. Responsable de correspondencia

- Uno de los autores debe designarse como **responsable de correspondencia**.
- Este autor será el punto de contacto principal para todas las comunicaciones relacionadas con el manuscrito.

4.4. Confirmación de recepción

- Una vez enviado el manuscrito, el sistema OJS enviará automáticamente un correo electrónico de confirmación al autor responsable de correspondencia.

4.5. Consultas y soporte

- Para consultas sobre el proceso de envío o problemas técnicos, los autores pueden contactar al equipo editorial a través de los siguientes correos electrónicos:
 - inquide@ug.edu.ec
 - francisco.duquea@ug.edu.ec

5. Proceso Editorial

El proceso editorial de INQUIDE está diseñado para garantizar la calidad, originalidad y rigor científico de los manuscritos publicados. A continuación, se describe el proceso paso a paso:

5.1. Revisión inicial

Una vez recibido el manuscrito, el equipo editorial realiza una revisión inicial para verificar los siguientes aspectos:

1. Temática: El manuscrito debe estar dentro del alcance temático de la revista (ciencias e ingeniería).
2. Formato y estructura: El manuscrito debe seguir el formato y la estructura establecidos por la revista (ver sección 3).
3. Citas y referencias: Todas las referencias bibliográficas deben estar correctamente citadas en el texto, siguiendo el estilo IEEE.
4. Originalidad: El manuscrito será sometido a una revisión de plagio utilizando software especializado. Se acepta un máximo del 15% de similitud con otros trabajos.

Si el manuscrito no cumple con alguno de estos requisitos, se solicitará al autor que realice las correcciones necesarias antes de continuar con el proceso de evaluación.

5.2. Evaluación por pares (Peer-Review)

Los manuscritos que superen la revisión inicial serán sometidos a un riguroso proceso de evaluación por pares bajo la metodología de doble ciego (double-blind review). Este proceso incluye los siguientes pasos:

1. Asignación de revisores:
 - El editor asignará al menos dos revisores especializados en el área temática del manuscrito.
 - Los revisores pueden ser expertos nacionales o internacionales.
2. Evaluación:
 - Los revisores evaluarán el manuscrito en función de criterios como originalidad, pertinencia, rigor científico, claridad y contribución al campo.
 - Cada revisor emitirá un informe con uno de los siguientes resultados:
 - Publicable sin cambios.
 - Publicable con cambios sugeridos.
 - Publicable con cambios obligatorios.
 - No publicable.
3. Decisión editorial:
 - El editor analizará los informes de los revisores y tomará una decisión final sobre la aceptación o rechazo del manuscrito.
 - Si el manuscrito es aceptado, se notificará al autor para que realice los cambios sugeridos (si aplica).



- Si el manuscrito es rechazado, se notificará al autor y se archivará el documento.

5.3. Tiempo de revisión

- El proceso de evaluación por pares tiene una duración mínima de 4 semanas.
- Una vez finalizado este período, se notificará al autor el resultado de la evaluación y las recomendaciones de los revisores.

5.4. Correcciones y versión final

- Si el manuscrito es aceptado con cambios, el autor deberá enviar la versión corregida dentro del plazo establecido por el editor.
- El equipo editorial verificará que las correcciones solicitadas hayan sido incorporadas correctamente antes de proceder con la publicación.

5.5. Publicación

- Los manuscritos aceptados serán publicados en los números semestrales de la revista (enero y julio).
- Los autores recibirán una notificación una vez que su trabajo esté disponible en la plataforma de la revista.

6. Publicación

INQUIDE – Ingeniería Química y Desarrollo publica dos números al año, en las siguientes fechas:

- Primer número: 1 de enero.
- Segundo número: 1 de julio.

6.1. Plazos de envío

Para garantizar la consideración de los manuscritos en los números correspondientes, los autores deben tener en cuenta los siguientes plazos:

- Manuscritos para el número de enero: Deben enviarse antes del 31 de octubre del año anterior.
- Manuscritos para el número de julio: Deben enviarse antes del 30 de abril del mismo año.

6.2. Disponibilidad de los artículos

- Una vez publicados, los artículos estarán disponibles en la plataforma electrónica de la revista, accesible a través de:
<https://revistas.ug.edu.ec/index.php/iqd>.
- Cada artículo publicado incluirá un DOI (Digital Object Identifier), lo que garantiza su identificación y acceso permanente.

6.3. Política de acceso abierto

INQUIDE es una revista de acceso abierto (open access), lo que significa que todos los artículos están disponibles gratuitamente para su lectura, descarga y distribución, bajo una licencia Creative Commons.

7. Información sobre el uso de Inteligencia Artificial

INQUIDE reconoce la importancia de mantener altos estándares éticos en la investigación científica, especialmente en el uso de Inteligencia Artificial (IA). Por ello, se establecen las siguientes directrices:

7.1. Uso de IA en la investigación

- Si se ha utilizado Inteligencia Artificial en cualquier etapa de la investigación presentada en el manuscrito,

los autores deben declararlo explícitamente en la Carta de Presentación (Cover Letter).

- Especifique las secciones del manuscrito en las que se ha empleado IA, describiendo su función y alcance.

7.2. Transparencia y responsabilidad

- Los autores son responsables de garantizar que el uso de IA no comprometa la originalidad, integridad y rigor científico del trabajo.
- El equipo editorial evaluará la declaración de uso de IA y podrá solicitar información adicional si es necesario.

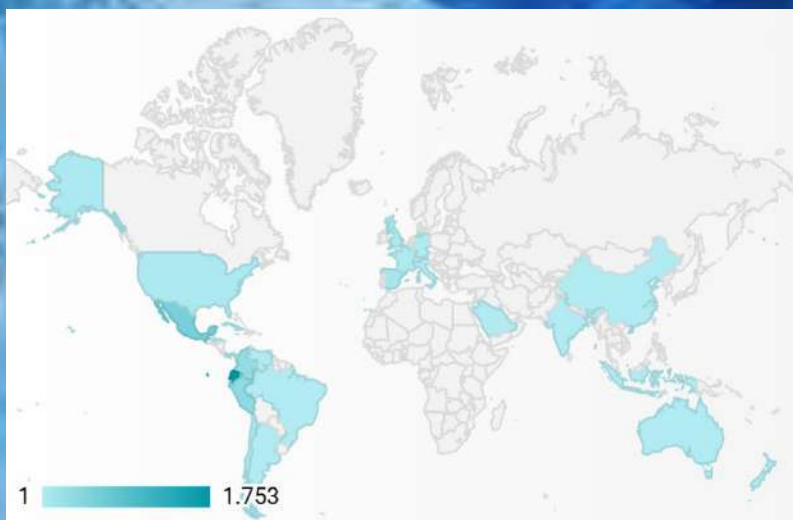
7.3. Aceptación de manuscritos con IA

- La decisión final sobre la aceptación de manuscritos que hayan utilizado IA queda a discreción del Consejo Editorial, basándose en la transparencia y el cumplimiento de las normas éticas de la revista.

INQUIDE

Exploramos lo desconocido,
resolvemos lo imposible.
Bienvenido a la frontera del
conocimiento.

Visitas por país.



Artículos más vistos.

Title.

Search by title, author and ID.

	Total
Jiménez Sánchez et al. Obtaining bacterial cellulose from kombucha by replacing black tea with coffee husk tea.	683
Duque-Aldaz et al. Prediction of moisture content in the cocoa drying process by simple linear regression.	671
Alulema Cuesta et al. Comparative study of extraction and characterization of avocado oil, through processes of: thermobating, enzymatic, hydraulic pressing and expeller.	451
Catarí et al. Photodegradation of microplastics.	411
España Francis et al. The cyanotoxins occurrence in water and fresh foods: human health implications.	392
Fu-López et al. Risk assessment and control measures for machinery in a food production company.	372
Carrera Coloma et al. Theoretical study of alternatives for the control of <i>Rupella albinella</i> in rice cultivars (<i>Oryza sativa</i>)	361
Gordillo Alvarado et al. Study of Cauje (<i>Pouteria caimito</i>) as a gastronomic nutritional food in school children from 6 to 12 years of age at the "León de Febres Cordero" school in the city of Guayaquil.	297
Bonilla Bermeo et al. Study of the bioadsorption of heavy metals (Pb and Cu) in the waters of the Puyango river, using orange and apple banana peel	278
Delgado Gómez et al. Implementation of gastrodiploacy as a strategic axis of tourism development and contribution to the cultural dissemination of Ecuador	274

Contacto principal.

Francisco Javier Duque-Aldaz
Universidad de Guayaquil
Teléfono +593 98 564 1201 WhatsApp
Teléfono +593 99 576 0762 Telegrama
francisco.duquea@ug.edu.ec
inquide@ug.edu.ec

Convierta su investigación en un legado.
Envíenos su artículo y únase a una
comunidad científica de gran impacto.