

# INQUIDE

Engenharia Química e Desenvolvimento

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

**Vol. 7 / No. 2**  
JULHO - DEZEMBRO 2025



## INQUIDE – Engenharia Química e Desenvolvimento

INQUIDE – Engenharia Química e Desenvolvimento \* Volume 7 \* Número 2 \* julho / dezembro 2025. Revista de Ciência e Tecnologia editada pela Faculdade de Engenharia Química da Universidade de Guayaquil (Equador). Divulga investigação aplicada em engenharia, processos industriais, desenvolvimento sustentável e gestão de tecnologia, com uma abordagem multidisciplinar no domínio da engenharia.

### Comissão Executiva:

Francisco Morán Peña, PhD, Universidade de Guayaquil, Equador. Reitor da Universidade de Guayaquil. <https://orcid.org/0000-0003-3655-6003>

Sofia Lovato Torres, PhD, Universidade de Guayaquil, Equador. Vice-Chanceler Académico da Universidade de Guayaquil. <https://orcid.org/0000-0001-5831-8554>

Luz Elvira Vásquez Luna, PhD, Universidade de Guayaquil, Equador. Decano de Pesquisa, Pós-Graduação e Internacionalização da Universidade de Guayaquil. <https://orcid.org/0000-0001-8709-2072>

Amalin Ladayse Mayorga Albán, PhD, Universidade de Guayaquil, Equador. Coordenador de Pesquisa e Gestão do Conhecimento da Universidade de Guayaquil <https://orcid.org/0000-0002-3667-0888>

Sandra Ronquillo Castro, PhD, Universidade de Guayaquil, Equador. Decano da Faculdade de Engenharia Química da Universidade de Guayaquil, Equador. <https://orcid.org/0000-0002-9048-8454>

Hugo Pérez Benítez, MSc. Universidade de Guayaquil, Equador. Vice-Diretor da Faculdade de Engenharia Química da Universidade de Guayaquil, Equador. <https://orcid.org/0000-0001-7460-4032>

Francisco Javier Duque-Aldaz, MSc. Universidade de Guayaquil, Equador. Editor Geral da Revista de Engenharia e Desenvolvimento Químico da Universidade de Guayaquil. <https://orcid.org/0000-0001-9533-1635>

### Membro do Comitê Científico Internacional

José Carmona Tapia, PhD, Universidade de Almeria; Espanha. <https://orcid.org/0000-0001-9319-4382>

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

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

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

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

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

### Membro do Conselho Editorial

Armando Fabrizzio López Vargas, PhD, Universidade Politécnica Salesiana; Equador. <https://orcid.org/0000-0001-6520-8011>

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

Aristides Reyes Bacardi; Mestre em Ciências pela Milagro State University; Equador. <https://orcid.org/0000-0002-3154-2000>

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

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

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

Luis Ángel Bucheli Carpio; MSc. Universidade Estadual de Milagro; Equador. <https://orcid.org/0000-0003-2277-603X>

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

Guilherme Efrén Villamagua Castillo; MSc. Universidade de Guayaquil; Equador. <https://orcid.org/0000-0002-1163-9606>

### Editor Geral

Francisco Javier Duque-Aldaz, MSc.

### Editorial

Faculdade de Engenharia Química da Universidade de Guayaquil (Guayaquil – Equador)

**Direitos de autor.** INQUIDE – Engenharia Química e Desenvolvimento / 2025, Universidade de Guayaquil. É permitida a reprodução total ou parcial desta revista citando a fonte.



*Ingeniería Química*

*y Desarrollo*

INQUIDE

Engenharia Química & Desenvolvimento

Volume 7 – Edição 2

Julho – dezembro 2025

ISSN eletrônico: 3028-8533

A administração do INQUIDE – Engenharia e Desenvolvimento Químico é realizada  
através dos seguintes parâmetros:

A revista utiliza o sistema acadêmico antiplágio: 

Os itens têm um código de identificação (Digital Object Identifier) 

O processo editorial é gerido através do Open Journal System



É uma publicação de Acesso Aberto com uma licença Creative Commons



Os artigos deste número podem ser consultados em

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

Faculdade de Engenharia Química

Universidade de Guayaquil

**O INQUIDE – Engenharia e Desenvolvimento Químico está indexado nas seguintes Bases de Dados e Sistemas de Informação:**

**Base de Dados Seletiva**



**Diretórios seletivos.**



**Pesquisa de Literatura Científica em Acesso Aberto.**



**Plataformas de Avaliação de Revistas**



**Arquivos Seletivos de Jornais**



**Ferramenta de métricas da Web**





## Apresentação.

Volume 7, Número 2 – INQUIIDE: Engenharia Química e Desenvolvimento

Caros Leitores e Investigadores,

É uma honra apresentar o segundo número do Volume 7 da INQUIIDE: Engenharia Química e Desenvolvimento, revista que consolida o seu compromisso com a divulgação de investigações inovadoras nas diversas áreas da engenharia e afins. Nesta edição, reúnem-se cinco contribuições científicas que abordam desafios tecnológicos, energéticos e ergonómicos, destacando soluções práticas com impacto industrial e ambiental.

O primeiro artigo, "Análise do poder calorífico de pellets e briquetes no aproveitamento do pseudocaule da Bananeira (*Musa paradisiaca*)", explora o potencial energético de biocombustíveis sólidos derivados de biomassa agrícola. Os resultados demonstram um elevado poder calorífico em pellets (22,657 MJ/kg) e briquetes (22,680 MJ/kg), cumprindo com normas internacionais como a ENplus e a NTC 2060, o que posiciona estes biocombustíveis como alternativas viáveis para a geração de energia renovável.

O segundo trabalho, "Projeto termo-hidráulico de um permutador de calor multitungular para aquecimento de metanol", apresenta o projeto detalhado de um equipamento-chave em processos industriais. O estudo calcula parâmetros críticos como o coeficiente global de transferência de calor (575,17 W/m<sup>2</sup>·K) e a área necessária (2,025 m<sup>2</sup>), validando a sua eficiência com quedas de pressão inferiores aos limites máximos estabelecidos.

A terceira contribuição, "Projeto termo-hidráulico de um permutador de calor de duplo tubo aletado para arrefecimento de acetona", aprofunda a otimização de permutadores de calor em contracorrente. Com uma carga térmica de 276 030 W e um fator de depuração de 0,359, o projeto proposto garante um desempenho ótimo em condições de fluxo turbulento, destacando a sua aplicabilidade na indústria química.

O quarto artigo, "Proposta Ergonómica Integral para a Redução de Riscos Músculo-esqueléticos na Produção de Sabões", aborda um tema crítico em saúde ocupacional. Através de análises estatísticas e avaliações posturais, identificam-se riscos como posturas forçadas (67% dos trabalhadores) e manipulação de cargas (33%), propondo soluções práticas para melhorar a produtividade e o bem-estar em ambientes industriais.

Por fim, o quinto estudo, "Aplicação de estratégias Lean não automatizadas para a melhoria da qualidade em processos de montagem manual", demonstra como intervenções de baixo custo, como a estandardização visual e eventos Kaizen, podem reduzir defeitos em 3,25% em linhas de montagem manual, oferecendo um modelo replicável para indústrias com recursos limitados.

## Convite aos Leitores.

Esta edição da INQUIIDE oferece uma perspetiva multidisciplinar sobre problemas reais, combinando rigor científico com aplicabilidade industrial. Convida-se os leitores a explorar estes artigos, que não só enriquecem o conhecimento académico, como também fornecem ferramentas valiosas para profissionais de engenharia, investigadores e decisores.

## Chamada a Colaboradores.

A INQUIIDE renova o seu convite à comunidade científica para submeter trabalhos originais que contribuam para o avanço da engenharia química e disciplinas relacionadas. A revista compromete-se a oferecer um processo editorial rigoroso e transparente, garantindo a disseminação de investigações de alta qualidade com impacto global. Os autores interessados podem contribuir para o próximo volume, ampliando as fronteiras do conhecimento num espaço de diálogo científico inclusivo e colaborativo.

Sem mais, desejamos uma excelente leitura e agradecemos o vosso apoio à nossa revista.

Atentamente,

Francisco Javier Duque-Aldaz  
Diretor-Editor  
INQUIIDE  
Engenharia Química e Desenvolvimento

# ÍNDICE

## Artigos de Investigação.

<b>Análise do poder calorífico de pellets e briquetes no uso do pseudocaule de banana (Musa paradisiaca)</b>	7
Análisis del poder calorífico de pellets y briquetas en el aprovechamiento del pseudotallo de Plátano (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	
<b>Projeto termo-hidráulico de um permutador de calor multitubular para aquecimento de metanol.....</b>	17
Diseño térmico-hidráulico de un intercambiador de calor multi-tubo para el calentamiento de metanol.	
Amaury Pérez Sánchez; Zamira María Sarduy Rodríguez; Arlenis Cristina Alfaro Martínez; Elizabeth Ranero González; Eddy Javier Pérez Sánchez	
<b>Projeto termo-hidráulico de um permutador de calor de duplo tubo aletado para arrefecimento de acetona.....</b>	26
Diseño térmico-hidráulico de un intercambiador de calor de doble tubo aleteado para el enfriamiento de acetona.	
Amaury Pérez Sánchez; Elizabeth Eianne Artigas Cañizares; Laura Thalia Alvarez Lores; Elizabeth Ranero González & Eddy Javier Pérez Sánchez.	
<b>Proposta ergonômica abrangente para a redução dos riscos musculoesqueléticos na produção de sabão: uma abordagem baseada em análise estatística e avaliação postural.....</b>	38
Propuesta Ergonómica Integral para la Reducción de Riesgos Musculoesqueléticos en la Producción de Jabones: Un Enfoque Basado en Análisis Estadístico y Evaluación Postural.	
Genesis Elizabeth Castro Rosales; Ashly Dayanna Torres Alvarado; Luis Stalin Zalamea Cedeño; Francisco Javier Duque-Aldaz & Fernando Raúl Rodríguez-Flores.	
<b>Aplicação de Estratégias Lean Não Automatizadas para Melhoria da Qualidade em Processos de Montagem Manuais: Um Estudo de Caso na Indústria de Linha Branca.....</b>	51
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.	
Jayling Selena Fu-López; Jaime Patricio Fierro Aguilar; Fernando Raúl Rodríguez-Flores Francisco Javier Duque-Aldaz	
<b>Orientações para publicação .....</b>	65

## Análise do poder calorífico de pellets e briquetes no uso do pseudocaule de banana (*Musa paradisiaca*).

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

Sandra Emperatriz Peña Murillo <sup>1\*</sup>; Eddie Manuel Zambrano Nevárez,<sup>2</sup> Sandra Elvira Fajardo Muñoz <sup>3</sup>; Nahir Alondra Pérez Ortiz,<sup>4</sup> Darla Rosário Vaca Choez <sup>5</sup>; Pablo Fajardo Echeverri <sup>6</sup>.

Recebido: 12/09/2024 – Aceite: 20 /04/2025 – Publicado: 01/07/2025

Artigos de  
Investigação

Artigos de  
Revisão

Artigos de  
Ensaio

\* Autor para correspondência.



### Resumo.

Os biocombustíveis sólidos pertencem à segunda geração de acordo com o tipo de biomassa obtida a partir de resíduos agrícolas, florestais e industriais, como o pseudocaule de banana, que é uma biomassa lignocelulósica que pode ser usada como alternativa para a geração de energia renovável na forma de pellets e briquetes devido às suas propriedades energéticas. O estudo tem como objetivo determinar a eficiência do poder calorífico de biocombustíveis sólidos à base de pseudocaule de banana-da-terra (*Musa paradisiaca*). A metodologia do estudo foi dividida em três partes: (1) obtenção e condicionamento de biomassa, (2) elaboração de biocombustíveis sólidos e (3) análise do potencial físico, proximal e energético da biomassa e respectiva ANOVA de pellets e briquetes. Encontrou-se alto poder calorífico para as composições 55-45% em pellet com 22.657 MJ/kg e 50-50% em briquete com 22.680 MJ/kg, atendendo aos parâmetros estabelecidos nas normas ENplus e NTC 2060, respectivamente.

### Palavras-chave.

Pseudocaule, Biomassa, Poder calorífico, Pellet e Briquete.

### 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 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 briqueta. Encontrándose un alto poder calorífico para las composiciones 55-45% en pellet con 22,657 MJ/Kg y 50-50% en briqueta 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 Briqueta.

## 1. Introdução

O Equador é um país que produz grandes quantidades de biomassa e resíduos lignocelulósicos por ano, que não são totalmente utilizados na área agrícola, embora a biomassa seja de grande importância na geração de energia limpa, uma vez que é explorada como matéria-prima alternativa para a produção de biocombustíveis sólidos. Portanto, a biomassa é um recurso disponível, que apresenta vantagens como facilidade de combustão, teor de celulose e neutralidade carbônica. [1]

De acordo com o Atlas de Bioenergia do Equador utilizando a base de dados ESPAC, em 2012 teve uma produtividade de 559 319 toneladas/ano, onde 372 576 t/ano corresponde a resíduos de campo (folhas, pseudocaule), a partir dos quais foi obtido um Poder Calorífico Inferior (PCI) de 4.180 TJ/kg. No entanto, de acordo com o INEN em 2022, o

Equador registrou 133.145 h de área plantada, dando uma colheita de 114.526 h, obtendo uma produção de 857.561,89 toneladas. Estima-se que de uma bananeira pesando cerca de 100 kg, obtém-se 88%, o que representa o total de resíduos e o cacho 12%, dando uma relação entre os resíduos da cultura e o cacho é de 2:1. Os resíduos lignocelulósicos gerados são as partes das culturas de espécies vegetais descartadas no período de colheita, que não são utilizadas para consumo, por isso no setor agrícola estimam-se 1,44 MMt de biomassa anual, no entanto, no setor florestal são produzidos 0,22 MMt/ano. [2] [3] [4] [5][6]

Nosso país tem uma grande demanda para a exportação de bananas verdes, que vem do Género *Musa* da família *Musáceas*, das espécies *paradisiaca L*. É uma planta

<sup>1</sup> Universidade de Guayaquil; [sanda.penam@ug.edu.ec](mailto:sanda.penam@ug.edu.ec); <https://orcid.org/0000-0002-7848-8021>; Guayaquil – Equador.

<sup>2</sup> Universidade de Guayaquil; [eddie.zambranon@ug.edu.ec](mailto:eddie.zambranon@ug.edu.ec); <https://orcid.org/0000-0003-0358-0402>; Guayaquil – Equador.

<sup>3</sup> Universidade de Guayaquil; [sandra.fajardom@ug.edu.ec](mailto:sandra.fajardom@ug.edu.ec); <https://orcid.org/0000-0002-2127-0777>; Guayaquil – Equador.

<sup>4</sup> Investigador Independente; [nahirperez11@hotmail.com](mailto:nahirperez11@hotmail.com); Guayaquil - Equador.

<sup>5</sup> Investigador Independente; [darlavaca22@outlook.es](mailto:darlavaca22@outlook.es); Guayaquil – Equador.

<sup>6</sup> Universidade do Valle; [pablo.fajardo@correounivalle.edu.co](mailto:pablo.fajardo@correounivalle.edu.co); <https://orcid.org/0000-0001-5257-0548>; Cali – Colômbia.

herbácea de grande porte, que é composta por um rizoma, um pseudocaule, folhas, flores e frutos (cachos). [7] Aproximadamente para obter uma tonelada de cachos verdes, foram produzidos 150 kg de ráquis, 480 kg de folhas e 3 toneladas de pseudocaule, por isso estes resíduos são utilizados como fertilizante e ração animal. [8]

O pseudocaule que ocorre em grandes quantidades de biomassa residual. É um caule formado por vagens largas, seu tamanho variou de 3,5 a 6 m e pesa cerca de 50 kg. Esta estrutura é composta por compostos lignocelulósicos tais como: celulose, lignina, hemicelulose e outros compostos químicos (K, Na, Ca, Mn, P). Devido às suas propriedades, pode ser utilizado como biomassa para geração de energia, através da produção de biocombustíveis e assim contribuir para a redução das emissões de gases que poluem o meio ambiente. Atualmente, o Equador tem se empenhado na adoção de energia renovável como parte regular de seu fornecimento de energia, com o uso de biomassa representando 1,99% da produção de eletricidade. [9]

Este artigo de pesquisa discute o uso da biomassa de *Musa paradisiaca* para a produção de biocombustíveis sólidos sob a forma de granulados e briquetes, reduzir os poluentes produzidos pelos combustíveis fósseis, escolhendo esta alternativa de substituição para reduzir também a erosão do solo, a desertificação, a degradação florestal e das culturas, uma vez que proporcionam uma combustão limpa. Serão utilizados os padrões de qualidade estabelecidos nas normas Enplus e NTC 2060, respectivamente. Além disso, a ASTM 3172-89 foi empregada para análises de biomassa proximal e biocombustível sólido. Por conseguinte, [10] O objetivo do estudo é determinar a eficiência do poder calorífico de biocombustíveis sólidos à base do pseudocaule da banana (*Musa paradisiaca*).

### 1.1. Pseudocaule de banana

O pseudocaule pesa cerca de 50 quilogramas e o seu comprimento varia entre os 3,5 e os 7,5 metros, sendo a sua principal função suportar as folhas que emergem na parte superior e no aglomerado. Estas folhas, de tom verde-escuro e extensão considerável, medem cerca de 2 a 4 metros de comprimento por 1,5 metros de largura. Sua estrutura se assemelha a um tronco de árvore, é herbácea na natureza e geralmente tem uma aparência robusta e espessa devido ao acúmulo de fibras vegetais. Ao contrário das árvores, os plátanos não têm um tronco de madeira maciça, em vez disso, o pseudocaule é composto por folhas dispostas em camadas concêntricas, que se sobreponem. O pseudocaule também tem a função de armazenar nutrientes e água para o crescimento da planta. [11] [12]

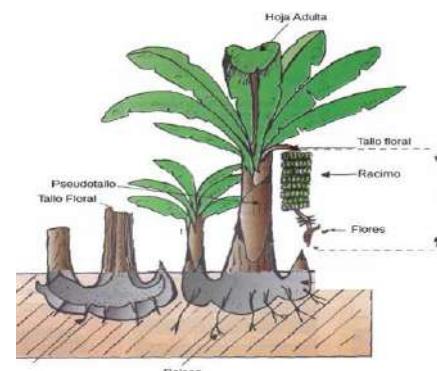


Gráfico 1 Bananeira. Fonte: [13].

O cultivo de banana no Equador é de 128.861 hectares plantados, distribuídos em 21 províncias, como mostra a Figura 2, indica que a produção de banana a nível nacional foi de 763.455 toneladas.



Gráfico 2 Distribuição da produção. Fonte: [14]

Em contrapartida, em 2022 foi registrado em 133.145 hectares plantados, como se pode ver na Figura 3, obtém-se o terceiro lugar em área plantada, alcançando uma produção de 857.561,89 toneladas e um rendimento de 7,49 toneladas/hectares, que é o quarto lugar em culturas permanentes no Equador. [2][15].

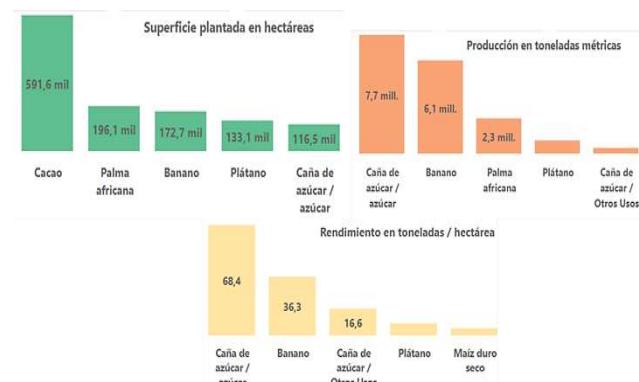


Gráfico 3 Área plantada de banana no Equador 2022. Fonte: [2]

### 1.2. Biocombustíveis

São combustíveis que são fabricados com biomassa, o que permite reduzir as emissões de gases com efeito de estufa, apenas se os seus processos forem sustentáveis, ou seja, emitirem uma pequena pegada de carbono. Na geração de energia por combustão, a biomassa utilizada deve ter baixas

porcentagens de lignina, a fim de produzir menores quantidades de resíduos carbonáceos, caso contrário a degradação térmica produzirá grandes quantidades deles. Estes biocombustíveis são classificados de acordo com a sua geração: [1]

- Os biocombustíveis de primeira geração utilizam biomassa proveniente de culturas agrícolas alimentares.
- A segunda geração utiliza biomassa lignocelulósica proveniente de resíduos florestais, agrícolas e urbanos.
- Na terceira geração, a sua biomassa provém de espécies não comestíveis.
- Finalmente, a quarta geração é feita a partir de microrganismos geneticamente modificados. [16]

Os biocombustíveis também são divididos de acordo com seu status em: Líquidos (Bioetanol, biodiesel, bioóleos), Sólidos (Pellets, chips, briquetes, carvão) e Gasosos (biogás, biometano, biohidrogênio). [17]

Esta investigação centra-se nos biocombustíveis sólidos (pellets e briquetes) que pertencem à segunda geração, o que permite uma pegada de carbono zero, pois a sua matéria-prima são resíduos lignocelulósicos, que é uma fonte biológica não totalmente explorada, o que seria uma grande alternativa de biomassa para a produção de biocombustíveis. [18]

### 1.3. Biocombustíveis sólidos

Os biocombustíveis sólidos são formas de combustível produzidas a partir de matéria orgânica de origem vegetal ou animal que podem ser utilizadas em diferentes aplicações para a produção de energia. Eles são adquiridos através de métodos físicos, como compressão, lascagem ou esmagamento. Especificamente, na geração de energia elétrica e térmica, são utilizados biocombustíveis sólidos produzidos a partir de restos de biomassa de operações florestais ou agroindustriais. A relevância dos biocombustíveis sólidos reside na sua grande capacidade de satisfazer as necessidades energéticas relacionadas com o aumento da população. A utilização de biocombustíveis sólidos permitirá substituir os combustíveis fósseis na produção de eletricidade e calor, reduzindo simultaneamente as desvantagens causadas pelos combustíveis tradicionais. Dentro da gama de biocombustíveis sólidos estão chips, briquetes e pellets, que são formas compactas com alta capacidade térmica. [19] [16] [20]

Os principais componentes utilizados na produção de biocombustíveis sólidos são derivados de materiais lignocelulósicos, que provêm da agricultura ou da silvicultura, pelo que os resíduos do agronegócio têm múltiplas utilizações potenciais, incluindo a criação de fertilizantes orgânicos ou o fabrico de biocombustíveis. [16]

Placa 1 Tipos de Biocombustíveis Sólidos.

Tipos	Fonte/fonte	Utilização
Estilhaço	Resíduos agrícolas e florestais. Culturas lenhosas. Desperdício agroalimentar.	Fornos de padaria, cerâmica, em pequenas indústrias, residências e aquecimento.
Carvão vegetal	Madeira e resíduos vegetais.	Doméstico.
Pellet & Briquete	Indústria da Madeira. Exemplo: Teca, alfafa, etc.	Combustível: em áreas industriais e de grande porte.

Nota: Informações obtidas de. Fonte: [21][22]



Gráfico 4 Tipos de Biocombustíveis Sólidos. Fonte: [21]

Aqui estão algumas características dos pellets e briquetes.

#### 1.3.1. Granulados

São biocombustíveis cilíndricos, de diferentes tipos de biomassa dos quais dependerá a sua cor (resíduos sólidos vegetais, animais, agroindustriais e urbanos), onde a sua gama de dimensões é: diâmetro de 6-8 mm e 3,15-40 mm de comprimento. Onde a propriedade fundamental é o poder calorífico  $\geq 16,5$ . Outras propriedades são a sua percentagem de humidade de  $\frac{MJ}{Kg} \leq 10\%$ . Este valor determina a quantidade de energia que os pellets produzirão quando forem submetidos à combustão, ou seja, se o teor de água for elevado, na combustão será eliminado primeiro e depois será produzido calor, obtendo-se um baixo poder calorífico. Além disso, as cinzas devem ser de 0,7% e uma densidade aparente de  $[23] \leq 600 \frac{Kg}{m^3} - 750 \frac{Kg}{m^3}$ , estas propriedades estão de acordo com a norma En Plus. [24]



Gráfico 5 Pellets. Nota: Pellets produzidos a partir de cascas de arroz. Fonte: [25]

### 1.3.2. Briquetes

São blocos sólidos de formas variadas (os mais comumente usados retangulares e redondos), que têm um diâmetro de mais de 5 cm e um comprimento entre. Onde a propriedade fundamental é o poder calorífico de  $12.500\text{-}21.000 \frac{MJ}{Kg}$ . Outras propriedades são a sua percentagem de humidade de 2,5% e cinzas 30% estas propriedades estão de acordo com o padrão colombiano.[26]



Gráfico 6 Briquetes. Nota: Briquetes de diferentes materiais e formas.  
Fonte: [27]

### 1.4. Biomassa

É um tipo de energia renovável que é obtida a partir de matéria orgânica, como resíduos agrícolas, florestais, alimentos, estrume, entre outros. Esta matéria orgânica pode ser utilizada como combustível para a produção de calor, eletricidade e biocombustíveis (Tepale Gómez, 2020). Além disso, a biomassa é uma fonte de energia renovável, uma vez que provém de organismos biológicos que podem ser cultivados e regenerados num período de tempo relativamente curto. Isto torna-a uma opção sustentável para a produção de energia, ao contrário dos recursos fósseis que são limitados e não podem ser regenerados. [20] [28]

Outro benefício da biomassa é que o seu processamento e utilização não requerem tecnologias complexas. Pode ser usado diretamente na forma de lenha, pellets ou briquetes, ou pode ser convertido em diferentes formas de energia, como eletricidade, calor ou biogás através de processos de combustão, gaseificação ou fermentação.[6]

A utilização da biomassa como recurso energético apresenta várias vantagens em comparação com o petróleo, o carvão e o gás:[6]

- Melhoria da situação socioeconómica das zonas rurais: A utilização de resíduos agrícolas para gerar energia a partir da biomassa pode gerar emprego e rendimento nas zonas rurais, impulsionando o desenvolvimento económico dessas zonas.[6]
- Redução das emissões poluentes: Ao utilizar biomassa em vez de combustíveis fósseis, reduzem-se as emissões de poluentes como enxofre, partículas, monóxido de carbono (CO), metano (CH<sub>4</sub>) e óxidos de

azoto (NO<sub>x</sub>), o que tem um impacto positivo na qualidade do ar e na saúde pública.[6]

- Ciclo neutro em CO<sub>2</sub>: A biomassa tem a vantagem de ser um recurso renovável e a sua combustão não contribui significativamente para o efeito de estufa, uma vez que o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) libertado durante a queima é o mesmo que foi absorvido pelas plantas durante o seu crescimento. Isto ajuda a reduzir as emissões de gases com efeito de estufa e a atenuar as alterações climáticas. [29]
- Potencial da América Latina e Caribe: Essas regiões possuem uma grande quantidade de recursos naturais e agrícolas, o que as posiciona como potenciais produtoras de biomassa. O desenvolvimento da bioeconomia nestas áreas pode impulsionar o seu desenvolvimento socioeconómico, bem como promover a segurança energética e reduzir a dependência dos combustíveis fósseis.[6]

Em resumo, a utilização da biomassa como recurso energético apresenta várias vantagens, tanto socioeconómicas como ambientais, o que a torna uma alternativa interessante e sustentável face aos combustíveis fósseis tradicionais. [6]

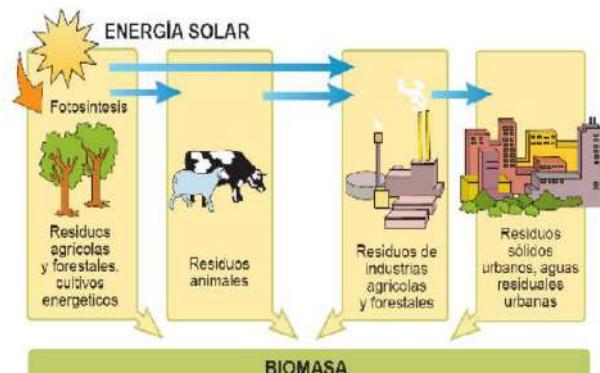


Gráfico 7 Biomassa. Fonte: [21].

### 1.5. Características

#### 1.5.1. Teor de humidade

Para o teste, seguiu-se o procedimento da norma ASTM D-3173, na qual foi utilizada a fórmula:

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

Em que:

A: gramas da amostra inicial em g.

B: gramas da amostra final, em g.

#### 1.5.2. Conteúdo de cinzas

O teor de cinzas de uma massa é determinado de acordo com a quantidade de minerais que contém, utilizando para isso a seguinte fórmula.[30]

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

$m_1$ : Massa e tampa vazias do cadrinho.

$m_2$ : Massa do cadiño e tampa +1 g de amostra.  
 $m_3$ : Massa e tampa do cadiño + amostra de mufla aquecida.

### 1.5.3. Densidade

Para este teste, os biocombustíveis foram pesados e seu volume determinado foi obtido, sendo então aplicada a seguinte equação:

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

$d$  = densidade

$m$  = massa

$v$  = volume

### 1.5.4. Poder calorífico

É a quantidade de energia que pode ser obtida pela queima de uma substância. Refere-se à capacidade de uma substância produzir calor através da realização de uma reação química de combustão completa [31]. O poder calorífico é medido em unidades de energia por unidades de massa, como joules ou calorias.

### 1.5.5. Material volátil:

Este teste da percentagem de material volátil foi trabalhado de acordo com a norma, utilizando a seguinte equação:[32]

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

$m_1$ : Massa e tampa vazias do cadiño.

$m_2$ : Massa do cadiño e tampa +1 g de amostra.

$m_3$ : Massa e tampa do cadiño + amostra

### 1.5.6. Carbono fixo

É a subtração de 100 e o resultado da soma da percentagem de humidade, cinzas e material volátil [33].

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

H: Percentagem de humidade.

C: Percentagem de cinzas.

MV: Percentagem de material volátil.

## 2. Materiais e métodos.

### Área de Estudo

A área de estudo inclui o lote 9 da urbanização Canaán I do Cantão de Cumandá (Chimborazo-Equador).

### 2.1. Metodologia

A metodologia do estudo está dividida em 3 secções: (1) Obtenção e condicionamento de biomassa (matéria-prima), (2) produção de pellets e briquetes e (3) Métodos de caracterização física, análise proximal e estrutural e respetiva anova.

### 2.2. Obtenção e acondicionamento de biomassa

A escolha desta biomassa baseia-se na sua abundante disponibilidade como resíduo agrícola no Equador e no seu elevado teor de componentes lignocelulósicos, adequados para a produção de biocombustíveis sólidos. Esta etapa inicial também inclui uma análise das condições de crescimento das plantas para garantir a uniformidade nas

amostras, incluindo dados sobre a idade da planta, condições do solo e tempo de colheita.

Amostras de pseudocaule de banana das espécies dominicana e barragañete foram coletadas aleatoriamente após a colheita, depois foram cortadas em forma retangular (2cmx5cm) e as peças foram expostas ao sol por 8 dias, para reduzir o teor de umidade. As amostras foram então secas em forno a uma temperatura de 60°C por 12 horas em latas de alumínio. Em seguida, foi introduzido em um moinho de martelo, a fim de reduzir seu tamanho, e então colocado em uma máquina vibratória por 5 minutos, até que as partículas diminuíssem para uma malha de 0,8 mm, 0,63 mm e 0,315 mm. Para finalizar com o condicionamento da biomassa, a umidade foi removida a 100°C por 6 h.

### 2.2.1. Composição química da biomassa

Análise proximal, realizada de acordo com a norma ASTM D3172-89 para determinar os teores de celulose, hemicelulose e lignina. A composição média obtida foi de 31,27% celulose, 15,07% hemicelulose e 23,9% lignina, o que apresenta alto teor energético adequado para uso em biocombustíveis.

### 2.3. Produção de pellets e briquetes

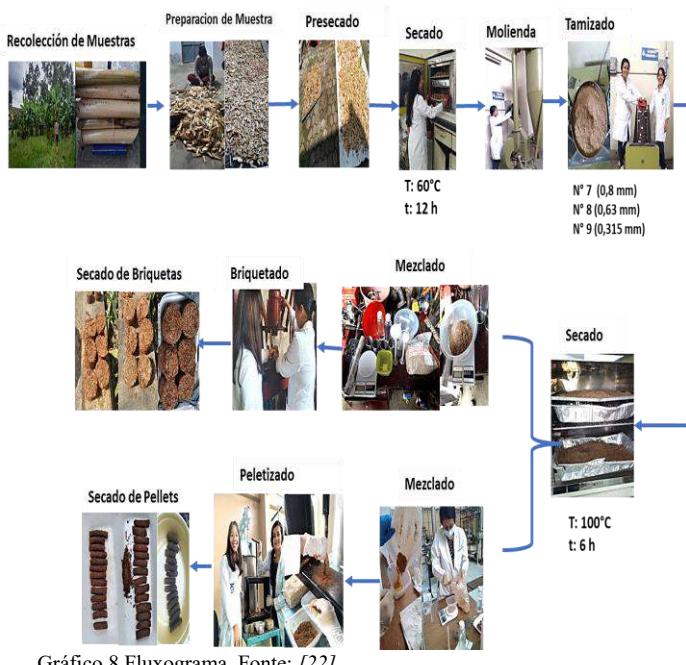
Nesta etapa, a biomassa foi homogeneizada com o aglutinante de acordo com as composições selecionadas, onde foram utilizadas as seguintes quantidades de aglutinante de biomassa.

Placa 2 Composições de Biocombustíveis Sólidos.

Composição	Quantidade de Biomassa (g)	Quantidade de aglutinante (g)	Quantidade de resíduo (g)	Quantidade de Biocombustíveis
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
Briquetes 50-50	205	205	8	6 Briquetes
Briquetes 55-45	270,6	221,4	6	6 Briquetes
Briquetes 60-40	246	164	11	6 Briquetes

Nota: Informações obtidas de [22]

Com as quantidades utilizadas em cada composição, obteve-se uma massa compacta por meio da máquina de pellets e briquetagem. Para finalizar com a secagem no ambiente por 72 horas dos pellets e briquetes produzidos.



#### 2.4. Métodos de caracterização física, análise proximal, análise estrutural e anova.

O poder calorífico foi avaliado utilizando uma bomba calorimétrica sob o padrão ASTM D5865. Esta análise incluiu a medição do teor energético em MJ/kg das amostras produzidas em diferentes composições. Além disso, a análise estatística ANOVA e o teste post-hoc de Tukey foram usados para determinar a significância das diferenças entre as composições de pellets e briquetes

##### 2.4.1. Caracterização física

Esta caracterização foi baseada nos procedimentos da norma ASTM S3172-89 para o teor de umidade para biomassa terrestre. Por outro lado, para os biocombustíveis sólidos, foi aplicado o mesmo padrão de teor húmido e a sua densidade foi encontrada.

Análises preliminares são essenciais para compreender a composição do pseudocaule. Você pode incluir uma análise da quantidade de celulose, hemicelulose e lignina, que são elementos-chave no poder calorífico da biomassa.

Com base em estudos anteriores, o pseudocaule da banana tem altos valores de celulose (entre 30-60%) e lignina, indicando sua adequação como biocombustível sólido

##### 2.4.2. Análise proximal

A caracterização da biomassa terrestre foi realizada utilizando a norma ASTM D3172-89, que descreve os métodos para determinação do teor de cinzas, material volátil e carbono fixo. Para o estudo do poder calorífico, o padrão ASTM D240 foi aplicado pelo laboratório LAQUINS ESPOL.

##### 2.4.3. Análise estrutural

As amostras foram enviadas para o laboratório LAQUINS ESPOL, para caracterização de lignina, celulose e hemicelulose. Estas análises foram realizadas de acordo com os TAPPI T 203 e 222.

##### 2.4.4. Anova

É o procedimento estatístico usado para avaliar hipóteses conhecidas como ANOVA e é usado para contrastar duas ou mais médias associadas a um fator comum. Este método é aplicado ao conjunto de dados, que gera variações, onde é submetido a diferentes condições onde se verifica se é semelhante ou desigual. Tem hipóteses Nulas e Alternativas, que para rejeitar a hipótese nula não devem satisfazer a condição de que um dos meios seja diferente dos demais. E, por outro lado, para que a hipótese alternativa seja rejeitada, todos os meios devem ser iguais. [34]

##### 2.4.5. Método de Tukey

O método de Tukey complementa as informações obtidas a partir da ANOVA, permitindo a comparação das médias amostrais obtidas a partir de um ensaio experimental. O valor de  $T\alpha$  é calculado a partir da seguinte equação (Cajal, 2022):

$$T\alpha = q\alpha(K, N - K)\sqrt{CME/n_i} \quad (6)$$

$T\alpha$  = número HSD (diferença honestamente significativa)  
 $q\alpha$  = quantis da distribuição de Tukey (tabela com significância relativa de 0,05% igual a 95% de confiabilidade)

$n$  = número de repetições do estudo

CME = Mean Square Error Fator representa o erro padrão de cada média

O teste de tukey afirma que quando a variação entre duas médias é superior ao valor de  $T\alpha$ , é considerado desigual, no entanto, se a diferença for menor, é considerado estatisticamente idêntico. [35]

### 3. Análise e Interpretação dos Resultados.

A caracterização física, análise proximal e estrutural da biomassa do pseudocaule da banana moída é apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 Resultados da Caracterização da Biomassa

Parâmetro	Unidade	Resultado	Método de Análise
*Poder calorífico	MJ/Kg	14,44	ASTM D240
Humidade	%	4,24	ASTM D3172-89
Cinzas	%	6,76	ASTM D3172-89
Material volátil	%	80,65	ASTM D3172-89
Carbono Fixo	%	8,34	ASTM D3172-89
*Lignina	%	23,9	TAPPI T 222
*Hemicelulosa	%	12,9	TAPPI T 203
*Celulose	%	13,7	TAPPI T 203

Observação: As análises foram realizadas no Laboratório da nossa Faculdade. \*Resultado retirado do relatório do Laboratório Laquins Espol. Fonte: [36].



Os resultados da análise proximal da biomassa do pseudocaule da banana, correspondendo a 4,240%, 6,761%, 80,659% e 8,3406% para os percentuais de umidade, cinzas, material volátil e carbono fixo, respectivamente, bem como 14,447 MJ/Kg de poder calorífico, que de acordo com a norma En plus e a norma colombiana NTC 2060 é um valor próximo ao limite permitido de teor energético para a produção de biocombustíveis sólidos.

Por outro lado, os resultados da análise proximal realizada na biomassa indicaram que foi obtida 23,9% de lignina, representando o maior componente do pseudocaule da banana, seguida de hemicelulose e celulose com frações mais baixas com os percentuais de 12,9% e 13,7%, respectivamente. Estes valores permitiram obter combinações homogéneas na fase de mistura.

Tabela 4 Comparação dos parâmetros dos resultados do Pellet com a Norma Espanhola.

Parâmetro	Unidade	50%-50% <sup>1</sup>	55%-45% <sup>2</sup>	60%-40% <sup>3</sup>	ENplus
*Poder calorífico	$\frac{MJ}{Kg}$	22,566	22,657	20,835	Atende
Humidade	%	5,190	6,888	6,403	Atende
Cinzas	%	3,641	3,425	4,248	Não compatível
Material volátil	%	87,001	86,301	86,181	-
Carbono Fixo	%	2,685	3,385	3,167	-
Densidade	$\frac{Kg}{m^3}$	750	650	273	Curvas <sup>1 e 2</sup>

Observação: As análises foram realizadas no Laboratório da nossa Faculdade. \*Resultado retirado do relatório do Laboratório Laquins Espol.

Fonte: [36] e Autores.

A Tabela 4 especifica os resultados da análise proximal das pastilhas. Dado que o teor de umidade nos biocombustíveis é um fator importante, uma vez que, à medida que diminui o poder calorífico aumenta, pode deduzir-se que tal não se reflete nos pellets obtidos, uma vez que, à medida que o teor de umidade aumenta 5,19%, o mesmo acontece com o seu poder calorífico de acordo com as composições 50-50 e 55-45, o que significa que o calor libertado na combustão, que é utilizado para evaporar a água, não influencia negativamente o poder calorífico. Tendo em conta que a composição 55-45 tem 22.566 MJ/kg de PC, considera-se que os pellets cumprem os parâmetros de qualidade do biocombustível sólido ideal para a produção de energia, de acordo com a norma ENplus.

De acordo com a norma espanhola, o valor da densidade de pellets deve ser maior ou igual a 600, portanto, as composições 50-50 e 55-45 obedecem a essa condição, uma vez que consistem em uma densidade de 750 e 650, no entanto,  $\frac{Kg}{m^3}$   $\frac{Kg}{m^3}$   $\frac{Kg}{m^3}$  com os dados obtidos a partir do teor de cinzas de pellets, nenhuma composição atende a esse parâmetro. No entanto, a composição 60-40 tem uma maior percentagem de cinzas, o que pode estar relacionado com o facto de a biomassa conter um elevado teor de compostos

inorgânicos. O teor de cinzas é inversamente proporcional ao poder calorífico.

Tabela 5 Comparação dos parâmetros dos resultados do Briquette com o Padrão NTC.

Parâmetro	Unidad e	50%-50%	55%-45%	60%-40%	Padrão NTC
*Poder calorífico	$\frac{MJ}{Kg}$	22,680	19,907	19,416	Atende
Humedad e	%	5,005	4,357	4,132	Não compatível
Cinzas	%	2,736	3,613	4,512	Atende
Material volátil	%	85,576	87,425	87,4227	Não compatível
Carbono Fixo	%	6,682	4,603	3,882	Atende
Densidad e	$\frac{Kg}{m^3}$	569,4	592,9	376,7	-

Fonte: [36][22]

Como pode ser visto na tabela 5, os resultados obtidos a partir dos testes fisico-químicos: o teor de umidade está ligado ao teor de energia, neste caso visualiza-se que quanto menor o teor de umidade menor o valor calorífico é obtido, portanto, na composição 60-40 obteve-se o maior teor de umidade e o mesmo maior teor energético. por conseguinte, considera-se que esta característica não afeta o poder calorífico deste tipo de biocombustível, o que inclui que a composição 50-50 com 22.680  $\frac{MJ}{Kg}$  tem um teor energético mais elevado em relação às proporções de 55-45 e 60-40 com 19.907  $\frac{MJ}{Kg}$  e 19.416, respectivamente, até certo ponto, embora as percentagens de teor de umidade não estejam dentro dos limites admissíveis da norma NTC 2060, o seu PC, se for, bem como o conteúdo das cinzas.  $\frac{MJ}{Kg}$

A análise proximal de cada briquete indicou que a composição de 55-45 tem uma maior densidade de 592,9  $\frac{Kg}{m^3}$ , seguida da relação 50-50 com 569,40 e 60-40 com um menor valor de 376,7.  $\frac{Kg}{m^3}$   $\frac{Kg}{m^3}$

#### 4. Discussão

##### 4.1. Comparação do poder calorífico entre granulados e briquetes

Tabela 6 Biocombustível sólido ideal.

Parâmetro	Unidade	Pellets 50%-50%	Pellets 55%-45%	Briquete 50%-50%	Briquete 55%-45%
Poder calorífico	$\frac{MJ}{Kg}$	22,566	22,657	22,680	19,907

Fonte: [36]

Nos pellets da composição 55-45, obteve-se um maior poder calorífico (PB), mas nos 50-50 diminuiu, dando 22.657  $\frac{MJ}{Kg}$  e 22.566, respectivamente. Por outro lado, em briquetes deu um alto teor energético na composição de 50-

50 com 22.680, enquanto em 55-45 foi reduzido para 19.907  $\frac{MJ}{Kg}$ . Portanto, considera-se que o uso do pseudocaule de banana como biomassa para uso energético deu um resultado ótimo no briquete de composição 50-50, de acordo com o PC.

Deve-se considerar que a configuração de pellets 55-45 não apresenta variação significativa no PB em comparação com a composição de briquetes 50-50, por isso considerou-se que o *Musa paradisiaca* é adequado como matéria-prima para a produção de biocombustíveis sólidos nas proporções acima mencionadas.

**Tabela 7** Resultados de variância do poder calorífico dos pellets.

Publicações	Conta	Soma	Média	Variância
Composição 50-50%	3	67,697	22,56566667	1.23333E-05
Composição 55-45%	3	67,972	22,65733333	1.23333E-05
Composição 60-40%	3	62,506	20,83533333	1.23333E-05

Fuente: [22]

**Tabela 8** ANOVA.

Origem das variações	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Média dos quadrados	F	Probabilidade	Valor crítico para F
Entre grupos	6,322140222	2	3,161070111	256302,982	1,60E-15	5,14325285
Dentro dos grupos	7,4E-05	6	1,23333E-05			
Total	6,322214222	8				

Fuente: [22]

### Decisão

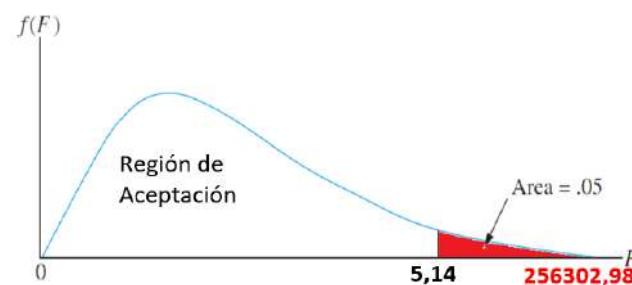


Gráfico 9 Distribuição F. Fonte: [37]

A Figura 9 indica que o valor correspondente a F excede o valor crítico de 5,14 de acordo com a zona de aceitação, e que há uma diferença significativa, a hipótese nula foi rejeitada.

**Tabela 9** Experimento Tukey a Pellets de acordo com o seu valor calórico. Composições A (50-50); B(55-45); C(60-40); Diferença da amostra; Decisão

$\mu_A - \mu_B$	0,09	Significativo
$\mu_A - \mu_C$	1,73	Significativo
$\mu_B - \mu_C$	1,82	Significativo

Observação:  $\mu$  = média da amostra em valor absoluto. Fonte: [22]

De acordo com o teste de Tukey, os valores da diferença amostral expressa em valor absoluto são comparados com  $T_{\alpha}= 0,009$  de Tukey, mostrando uma diferença significativa em mais de um teste, o que indica que a hipótese nula é rejeitada e a hipótese alternativa é aceita.

**Tabela 10** Resultados de variância do poder calorífico do briquete.

Publicações	Conta	Soma	Média	Variância
Composição 50-50%	3	68,042	22,681	9.33333E-06
Composição 55-45%	3	59,721	19,907	9E-06
Composição 60-40%	3	58,248	19,416	1E-06

Fuente: [22]

**Tabela 11** ANOVA.

Origem das variações	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Média dos quadrados	F	Probabilidade	Valor crítico para F
Entre grupos	18,5923562	2	9,2961781	1442510,3	8,99506E-18	5,143252
Dentro dos grupos	3,86667E-05	6	6,44E-06			
Total	18,5923948	8				

Fuente: [22]

### 4.2. Decisão

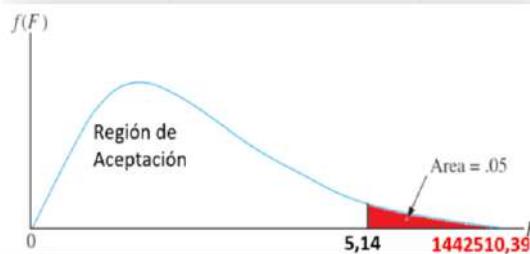


Gráfico 10 Distribuição F. Fonte: [37]

No Gráfico 10, a distribuição dos valores F com uma probabilidade de significância de 0,05 é mostrada. A hipótese nula é rejeitada, uma vez que o valor de F está fora da região de aceitação, indicando uma diferença significativa entre os valores de poder calorífico dos briquetes.

**Tabela 12** Experimente os pellets Tukey de acordo com o seu poder calorífico.

Composições A (50-50); B(55-45); C(60-40)	Diferença da amostra	Decisão
$\mu_A - \mu_B$	2,77	Significativo
$\mu_A - \mu_C$	3,26	Significativo
$\mu_B - \mu_C$	0,49	Significativo

Nota:  $\mu$ = média da amostra em valor absoluto. Fonte: [22]

Na *Tabela 12*, eles mostram que os valores de diferença amostral dados em valor absoluto são maiores em comparação com o valor de  $T_{\alpha}=0,006$ , o que indica que todas as composições têm uma diferença significativa aprovando a hipótese alternativa, que especifica que pelo menos um valor deve ser diferente dos demais, ao contrário da hipótese nula que expressa que a diferença dos valores das médias deve ser igual, ou seja, não apresentam diferença significativa, para serem aceites.

## 5. Conclusões.

Os resíduos da bananeira são uma matéria-prima gerada em grandes quantidades no Equador. Nesta pesquisa, a eficiência dos biocombustíveis sólidos foi determinada a partir da análise do poder calorífico, resultando em pellets e briquetes dentro dos regulamentos para biocombustíveis sólidos, com 22.657 MJ/Kg e 22.680 MJ/Kg, respectivamente. Portanto, é evidente que o biocombustível sólido com maior poder calorífico é o briquete à base de pseudocaule de banana, onde foram alcançados 5% de umidade e um rendimento de produção de 98,04%. Portanto, os resultados mostram que o pseudocaule de banana é viável e uma ótima alternativa de biomassa para a produção de briquetes, pois a partir da biomassa do solo foi atingida 14,44 de  $\frac{MJ}{Kg}$  poder calorífico, o que se destaca porque sem a aplicação de uma substância de ligação ela cumpre a Norma NTC 2060 onde estabelece que para ser classificada como briquete seu poder calorífico deve estar entre a faixa de 12,5 - 21  $\frac{MJ}{Kg}$ . Além disso, esta pesquisa marca o início de mais estudos sobre os resíduos da bananeira, em que 100% de biomassa é utilizada sem a necessidade de ligantes, onde a quantidade de resíduos desta planta poderia ser reduzida, para a geração de energia de forma renovável e com pegada de carbono zero. que contribui para o cuidado do meio ambiente.

## 6.- Contribuições do Autor (Taxonomia de Papéis de Colaborador (CRediT))

1. Conceituação: Nahir Alondra Pérez
2. Investigação: Nahir Alondra Pérez
3. Metodologia: Nahir Alondra Pérez
4. Gestão de projetos: Sandra Peña
5. Recursos: Sandra Peña
6. Supervisão: Sandra Peña

7. Validação: Darla Vaca
8. Visualização: Sandra Peña
9. Redação - rascunho original: Nahir Alondra Pérez e Sandra Peña
10. Redação - revisão e edição: Sandra Fajardo
11. Revisão: Eddie Zambrano e Pablo Fajardo

## 7.- Referências.

- [ D. A. Aguilar Romero, «Determination of the energy potential of the residual biomass of banana crops in the Machala Canton, El Oro, Ecuador.», novembro de 2019. [Em linha]. Disponível: <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/18090>.
- [ INEN, ESPAC, "Superfície de baixo trabalho agrícola", 2022. [Em 2 linhas]. Disponível:
- [ <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiZTEyY2NiZDItYjIzYi00ZGQ1LTlkNGEtNDE1OGViM2Q1N2VliwidCl6ImYxNThhMmU4LWNhZWtNDQwNi1iMGFiLWY1ZTI1OWJkYTExMiJ9&pageName=ReportSection>.
- [ UPM, "A banana, mais desperdício do que produto. Uma fonte de 3 bioenergia?", 17 de maio de 2016. [Em linha]. Disponível: <https://www.upm.es/UPM/SalaPrensa/Noticias?fmt=detail&prefmt=articulo&id=8b69e368289a4510VgnVCM10000009c7648a>.
- [ C. Jiménez Coello, «Avaliação de polímeros presentes em 4 pseudocaules de Musa acuminata AAA, Musa sapientum ABB e Musa paradisiaca AAB para a produção de bioplástico.», 2017. [Em linha]. Disponível: [https://ecosur.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1017/1586/1/10000058414\\_documento.pdf](https://ecosur.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1017/1586/1/10000058414_documento.pdf).
- [ R. A. Sánchez Landí, "Avaliação da contribuição de resíduos de 5 pseudocaule no crescimento e vigor de bananeiras (Musa Aaa)", 2021. [Em linha]. Disponível: <https://cia.uangraria.edu.ec/Archivos/SANCHEZ%20LANDI%20ROS A%20ANGELICA.pdf>.
- [ Y. Vargas-García, J. Pazmiño-Sánchez e J. Dávila-Rincón, "Biomass 6 potential in South America for the production of bioplastics. Uma ] Revisão", 2022.
- [ J. E. Pincay Moran, J. F. Ramírez Salcan, A. F. López Vargas, F. J. Duque-Aldaz, W. Villamagua Castillo e R. Sánchez Casanova, ] «Avaliação e Proposta de um Sistema de Gestão Ambiental numa Plantação de Manga», *INQUIIDE*, vol. 7, nº 1, p. 23-34, 2025.
- [ L. E. Velázquez Áraque, J. M. Aguilar Sierra e Y. A. Tulcán Álvarez, ] «Estudo do potencial energético da casca de arroz equatoriana ] peletizada para uso como combustível», *INQUIIDE*, vol. 2, nº 1, p. 44-51, 2022.
- [ J. Serrano, W. Mejía, J. Ortiz, A. Sánchez e S. Zalamea, ] «Determination of the Potential of Electricity Generation from Biomass in Ecuador», *Journal of the Faculty of Chemical Sciences*, nº 17, 18 de setembro de 2017.
- [ S. E. Fajardo Muñoz e V. M. Lituma Mandujano, «Pellet processing 1 using the peel of breadfruit (*Artocarpus Altilis*) to be used as a 0 biofuel.», *INQUIIDE*, vol. 2, nº 2, p. 21-33, 2022.
- [ ]
- [ ECORAE; UMDS; OEA; INIAP; GTZ, Compêndio de 1 Recomendações Tecnológicas para as Principais Culturas da 1 Amazônia Equatoriana, Quito, 2001, p. 120.
- [ ]
- [ J. Domingues Lima, N. De Souza Bravo, D. Eduardo Rozane, E. Shigueaki Nomura, S. Modenese Gorla da Silva e E. Nardini Gomes, ] «Gestão de resíduos de pseudocaule para aumentar o crescimento de ] mudas de bananeira», 2020.
- [ D. E. Carchi Maurat, "Use of Agricultural Waste from Banana 1 Cultivation to Obtain Nanocellulose" (Uso de resíduos agrícolas do 3 cultivo de banana para obtenção de nanocelulose), 2014. [Em linha]. ] Disponível: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/5292/1/tesis.pdf>.



- [ INEC, ESPAC, "Boletim Situacional", 2021. [Em linha]. Disponível: 1 [http://sipa.agricultura.gob.ec/boletines/situacionales/2021/boletin\\_situacional\\_platano\\_2021.pdf](http://sipa.agricultura.gob.ec/boletines/situacionales/2021/boletin_situacional_platano_2021.pdf). ]
- [ INEC, ESPAC, "Ficha de Cultivo (Musa AAA)", 2022. [Em linha]. 1 Disponível: <http://sipa.agricultura.gob.ec/index.php/platano>. 5 ]
- [ I. M. Ríos Badrán, J. Santos Cruz e C. Gutiérrez Antonio, «Solid 1 Biofuels: A solution to global warming», *Ciencia*, vol. 68, nº 4, pp. 1- 6 7, dezembro de 2017. ]
- [ M. U. Arteaga Peñafiel, M. Briones Córdova y P. Velásquez Pionce, 1 «Extração e aplicação de óleos essenciais de feijoa como conservante 7 na produção de enchidos de massa fina», *INQUIIDE*, vol. 3, nº 12, p. 64-74, 2023. ]
- [ M. D. Cortés Sánchez, E. Gata Montero, A. Pipió Ternero, Á. 1 Rodríguez Rivas e J. Sánchez Santos, «Biocombustíveis: Tipos e 8 estratégias de produção», *MOLEQLA*, nº 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 caca 9 drying process by simple linear regression.», *INQUIIDE*, vol. 6, nº 2, 0 pp. 20-20, 2024. ]
- [ S. E. Peña Murillo e E. M. Zambrano Nevárez, Biofuels Utilization of 2 Biomass, Primeira 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 e D. R. Vaca Choez, "Use of the banana 2 pseudostem (Musa paradisiaca) as an alternative for," 09 2023. [Em 2 linha]. Disponível: <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/70726>. ]
- [ J. M. Aguilar Sierra e E. A. Tulcám Álvarez, Artistas, *Estudo do 2 potencial energético da casca de arroz equatoriana peletada para uso 3 como combustível*. [Arte]. Universidade de Guayaquil, 2018. ]
- [ European Pellet Council, "Quality Certification Scheme for Wood 2 Pellets", agosto de 2015. [Em linha]. Disponível: <https://enplus-pellets.eu/es/component/attachments/?task=download&id=162:ENplus-Manual-Espaa-vs-3>. ]
- [ I. Ríos Badrán, I. Lizardo Ocampo, J. Santos Cruz, G. T. Juan e C. 2 Gutiérrez Antonio, «Solid Iofuels: An Economic and Sustainable 5 Alternative for Electric Power Generation in Mexico», *Digital 1 Ciencia*, vol. 12, nº 2, pp. 61-66, 12 2019. ]
- [ NTC 2060, "NTC 2060 - Briquetes de Combustível para Uso 2 Doméstico", ICONTEC, 04 de novembro de 1987. [Em linha]. 6 Disponível: <https://tienda.icontec.org/gp-briquetas-combustibles-para-uso-domestico-ntc2060-1987.html>. [Acesso em 19, 12, 2024]. ]
- [ INTEREMPRESAS, «Briquetar para avail.», 24 10 2011. [Em linha]. 2 Disponível: 7 <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 Waste for the 8 Production of Solid Biofuel.», *Migration Letters*, vol. 20, nº S5, pp. 928-940, 24 08 2023. ]
- [ S. Peña Murillo e J. López Galán, "Sustainable Development and 2 Learning Opportunity for Biorefineries: An Alternative to Biomass", 9 *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» (Método de ensaio padrão para 0 cinzas na amostra de análise de carvão e coque do carvão), 2012. ]
- [ L. V. Bermeo Valencia, «Obtaining biochar by dry torrefaction from 3 balsa waste (Ochroma pyramidale)», EPN, Quito, 2018. 1 ]
- [ ASTM D-3175, «Standard Test Method for Volatile Matter in the 3 Analysis Sample of Coal and Coke1», 2018. 2 ]
- [ ASTM D-3172, «Standard Practice For Proximate Analysis of Coal 3 and Coke» (Prática padrão para análise centesimal de carvão e coque), 3 2002. ]
- [ C. Camacho, «Análise de variância», Universidade de Sevilha, 3 Sevilha, 2020. 4 ]
- [ A. Cajal, "Teste de Tukey", Lifeder, 15 12 2022. [Em linha]. 3 Disponível: <https://www.lifeder.com/prueba-de-tukey/>. [Acesso em 5 15 01 2025]. ]
- [ LAQUINS-ESPOL, "Relatório de Análise", Guayaquil, 2023. 3 ]
- [ E. Camones Ibarra, Direção, *Como realizar a Análise de Variância 3 ANOVA*. [Filme]. 2021. 7 ]



# Projeto termo-hidráulico de um permutador de calor multitubular para aquecimento de metanol.

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

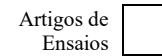
Amaury Pérez Sánchez <sup>1\*</sup>; Zamira María Sarduy Rodríguez <sup>2</sup>; Arlenis Cristina Alfaro Martínez <sup>3</sup>; Elizabeth Ranero González <sup>4</sup>; Eddy Javier Pérez Sánchez <sup>5</sup>

Recebido: 15/12/2024 – Aceite: 15/03/2025 – Publicado: 01/07/2025

Artigos de  
Investigação



Artigos de  
Revisão



\* Autor para correspondência.



## Resumo

Um tipo de permutador de calor que tem ganho atenção significativa devido à sua simplicidade, robustez e ampla variedade de aplicações é o permutador de calor multitubular. No presente trabalho, foi projetado um permutador de calor multitubular do ponto de vista termo-hidráulico, com o objetivo de aquecer uma corrente de metanol até 60 °C, utilizando condensado de água como fluido de transferência de calor. Para o dimensionamento deste equipamento, foi empregue uma metodologia de cálculo clássica e amplamente reconhecida, onde foram calculados diversos parâmetros importantes de projeto, tais como o coeficiente global de transferência de calor (575,17 W/m<sup>2</sup>.K), a área de transferência de calor necessária (2,025 m<sup>2</sup>) e a Diferença de Temperatura Média Logarítmica (38,02 °C). Os valores calculados para a queda de pressão nas correntes de metanol e água foram de 3.257,66 Pa e 752,88 Pa, respectivamente, inferiores aos limites máximos estabelecidos para o serviço de permutação de calor em ambas as correntes. O permutador de calor multitubular projetado apresentará um comprimento total de 5,76 m.

## Palavras-chave:

Área de transferência de calor, permutador de calor multitubular, queda de pressão, comprimento do tubo.

## 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/m<sup>2</sup>.K), el área de transferencia de calor requerida (2,025 m<sup>2</sup>) 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

## 1. Introdução

Os permutadores de calor são dispositivos térmicos concebidos para a troca eficiente de calor entre dois fluidos, seja em contacto direto, misturados ou separados por uma parede sólida fina (não misturados). Apresentam-se numa variedade de tamanhos, formas e tipos de construção, dependendo do propósito industrial. O desempenho dos permutadores de calor pode ser melhorado através de um design adequado e do estabelecimento de especificações ótimas de operação. Por conseguinte, a melhoria contínua dos diferentes aspectos do design e das características de desempenho dos permutadores de calor é o principal

objetivo tanto dos investigadores como dos fabricantes que trabalham nesta área [1].

O design térmico dos permutadores de calor depende grandemente das propriedades físicas para obter os coeficientes de transferência de calor e, por isso, para realizar os cálculos de projeto, como a área de troca de calor e os coeficientes globais de transferência de calor [2].

Entre os permutadores de calor tubulares mais comuns utilizados atualmente em muitas indústrias encontram-se os permutadores de calor multitubulares (MTHE), que compreendem vários tubos de pequeno diâmetro alinhados em paralelo dentro de uma carcaça exterior de maior

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

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

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

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

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

diâmetro (Figura 1). Nos projetos soldados, os tubos interiores e a carcaça estão soldados às placas tubulares [3].



Fig. 1. Vista geral de um permutador de calor multitubular.  
Fonte: [3].

Adequados para aquecimento, arrefecimento, esterilização e tratamento térmico, os permutadores de calor multitubulares (MTHE) podem processar uma grande variedade de líquidos (lácteos, sumos, molhos, bebidas, alimentos processados) desde baixas até viscosidades médias/altas, dependendo do propósito. Também podem ser utilizados para produtos com partículas quando equipados com uma placa tubular cônica [3].

Devido à sua montagem com configurações distintas de tubos interiores agrupados dentro de uma carcaça exterior, os MTHE geram uma superfície significativa de troca de calor num espaço volumétrico razoavelmente pequeno. Esta configuração torna este tipo de permutador de calor valioso para gerir uma ampla gama de caudais. Entre as principais características deste tipo de permutadores de calor encontram-se [3]:

O uso de foles de expansão térmica para absorver diferenças de dilatação.

Placa tubular cônica para líquidos que contêm partículas.

Os deflectores são geralmente instalados para fornecer resistência mecânica e melhorar a transferência de calor no lado da carcaça.

O lado do produto pode ser inspecionado removendo as curvas entre unidades. Todos os tubos interiores são observáveis.

Baixo custo, manutenção simples com o único requisito de substituir periodicamente as juntas nas ligações.

Segundo [4], estas unidades são normalmente construídas por empresas especializadas, existindo vários sistemas de fecho protegidos por patente. Podem ser uma solução económica em casos onde os caudais são relativamente pequenos e é necessário aplicar uma configuração em contracorrente.

Estão limitados a alguns poucos tubos interiores, pois para tamanhos maiores este tipo de montagem torna-se complicado. Não são uma solução competitiva face aos

permutoadores de calor de casco e tubos (STHE), embora sejam mais económicos do que estes [5], e estão restringidos a aplicações onde a área de transferência de calor requerida seja inferior a 10 ou 15 m<sup>2</sup> [4].

Uma análise térmica eficiente e precisa dos MTHE fornece a base para um design bem-sucedido [6]. A principal atenção no design dos MTHE é a eficiência na dissipação de calor por condução sólida e convecção forçada. Um bom MTHE deve ter uma configuração multitubular ótima para dissipar a maior quantidade de calor possível [6].

Existem poucos estudos reportados na literatura aberta onde se projete ou dimensione um permutador de calor multitubular. Nesse sentido, em [7] propõe-se um permutador de calor multitubular coaxial (CMTHE) integrado com um ciclo Orgânico de Rankine (ORC) geotérmico de 50 kW, com o objetivo de realizar dois testes de campo para examinar a resposta do sistema ORC face a alterações aplicadas ao CMTHE. Neste estudo, o fluido de trabalho no lado dos tubos do permutador é água pura com um caudal de 13 toneladas por hora, enquanto no lado da carcaça o fluido de trabalho é água geotérmica quente (~120 °C). O CMTHE utilizado neste trabalho tem um comprimento total de 11 m, uma área efetiva de transferência de calor de 18,6 m<sup>2</sup>, e os diâmetros interno e externo dos tubos são de 10,7 mm e 12,7 mm, respectivamente.

Outros autores [1] investigaram a influência de vários parâmetros operacionais no desempenho de permutadores de calor de tubos concêntricos com aletas e do tipo hairpin multitubular sem aletas. Foi desenvolvido um programa informático para realizar cálculos termo-hidráulicos usando MATLAB. Posteriormente, o código desenvolvido foi verificado quanto à fiabilidade e precisão, comparando-o com alguns projetos existentes e aceitáveis de permutadores de calor de tubo único com aletas e hairpin multitubulares sem aletas. O permutador de calor multitubular sem aletas com fluxo em contracorrente avaliado neste estudo utilizou água doce no lado da carcaça e água oleosa no lado dos tubos, com um caudal mássico de 6.622 kg/h para ambos os fluidos. Os diâmetros interno e externo dos tubos foram de 17,95 mm e 22,21 mm, respectivamente; o número de tubos interiores foi 7; as temperaturas de entrada do fluido do lado dos tubos (água oleosa) e do lado da carcaça (água doce) foram 247 °C e 80 °C, respectivamente; e o comprimento total do permutador foi de 60,96 m. Finalmente, as perdas de pressão permitidas para ambos os fluidos foram de 137.895,15 Pa, enquanto a perda real de pressão da água oleosa no lado dos tubos foi de 22.063,22 Pa.

Do mesmo modo, em [6] propôs-se um modelo matemático geral para o design ótimo de eficiência de transferência de calor de permutadores de calor compactos multitubulares utilizando conceitos de otimização topológica. Para os objetivos de otimização, a configuração multitubular foi



transformada numa distribuição equivalente de material celular dentro de uma secção transversal dada, exemplificada por duas variáveis de projeto: a densidade celular relativa local e o tamanho da célula.

Além disso, em [8] foi realizada uma investigação numérica sobre o desempenho de um permutador de calor multutubular baseado em material de mudança de fase, incorporando duas novas configurações de aletas, com o intuito de melhorar a transferência de calor. Finalmente, numa investigação experimental e numérica abrangente, [9] estudou permutadores de calor de tubo duplo e multutubulares com superfícies lisas e com aletas retangulares, com o objetivo de apresentar as condições operativas mais ótimas.

Uma certa fábrica química localizada em Cuba necessita aquecer uma corrente de metanol líquido até 60 °C utilizando água quente (condensado), tendo sido proposto um permutador de calor multutubular, devido aos caudais relativamente pequenos dos fluidos, à disponibilidade suficiente de espaço e a limitações orçamentais. Neste contexto, o presente trabalho projeta um MTHE aplicando a metodologia reportada em [10], onde se determinam vários parâmetros importantes como o coeficiente global de transferência de calor, a área requerida de troca térmica, o comprimento do permutador de calor e a queda de pressão de ambos os fluidos.

## 2. Materiais e métodos

### 2.1. Enquadramento do problema

É necessário pré-aquecer 2.000 kg/h de uma corrente de metanol líquido de 30 °C até 60 °C utilizando 3.000 kg/h de água quente (condensado) disponível a 90 °C. Para isso, foi proposto um permutador de calor multutubular com um diâmetro interno da carcaça de 72,1 mm, equipado com sete tubos interiores com diâmetros interno e externo de 14 mm e 16 mm, respectivamente. As quedas de pressão para as correntes de metanol e água não devem ultrapassar 3.500 e 1.000 Pa, respectivamente. O material dos tubos é aço carbono; os fluidos fluirão num arranjo em contracorrente dentro do permutador de calor, enquanto os fatores de sujidade para o metanol e a água são 0,000352 e 0,000088 K·m<sup>2</sup>/W, respectivamente [11].

De acordo com as recomendações reportadas por [12], o fluido frio (metanol) ficará no lado dos tubos, enquanto o fluido quente (água) ficará no lado da carcaça. Os diâmetros internos das bocas do lado dos tubos e do lado da carcaça são 32 mm e 50 mm, respectivamente, e a espessura da parede dos tubos é de 2 mm. É necessário conhecer o comprimento dos tubos requerido para este permutador multutubular, bem como as quedas de pressão de ambas as correntes, para a transferência de calor solicitada pelo serviço de troca térmica. Para o design do MTHE, deve ser empregue a metodologia de cálculo proposta por [10].

### 2.2. Cálculo do comprimento dos tubos

Passo 1. Definição dos dados iniciais disponíveis:

Caudal mássico de metanol ( $m_c$ ).

Caudal mássico de água ( $m_h$ ).

Temperatura de entrada do metanol ( $t_1$ ).

Temperatura de saída do metanol ( $t_2$ ).

Temperatura de entrada da água ( $T_1$ ).

Diâmetro interno da carcaça ( $D_i$ ).

Diâmetro interno dos tubos ( $d_i$ ).

Diâmetro externo dos tubos ( $d_e$ ).

Diâmetro interno da boca do lado dos tubos ( $d_N$ ).

Diâmetro interno da boca do lado da carcaça ( $D_N$ ).

Condutividade térmica do material dos tubos (aço carbono) ( $k_t$ ).

Espessura da parede dos tubos ( $e_i$ ).

Fator de sujidade do metanol ( $R_c$ ).

Fator de sujidade da água ( $R_h$ ).

Número de tubos interiores ( $n$ ).

Queda de pressão máxima permitida para o metanol [ $\Delta P_c(a)$ ].

Queda de pressão máxima permitida para a água [ $\Delta P_h(a)$ ]).

Passo 2. Temperatura média do metanol ( $\bar{t}$ ):

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

Passo 3. Parâmetros físicos do metanol à temperatura média determinada no passo 1:

Os seguintes parâmetros devem ser definidos para o metanol à temperatura média:

• Densidade ( $\rho_c$ ) [kg/m<sup>3</sup>].

• Viscosidade ( $\mu_c$ ) [Pa·s].

• Capacidade calorífica ( $Cp_c$ ) [J/kg·K].

• Condutividade térmica ( $k_c$ ) [W/m·K].

Passo 4. Carga térmica (Q):

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

Passo 5. Capacidade calorífica da água ( $Cp_h$ ) à temperatura de entrada da água ( $T_1$ ):

Passo 6. Temperatura de saída da água ( $T_2$ ):

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

Passo 7. Temperatura média da água ( $\bar{T}$ ):

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

Passo 8. Parâmetros físicos da água à temperatura média determinada no passo 6:

Os seguintes parâmetros devem ser definidos para a água à sua temperatura média:



Densidade ( $\rho_h$ ) [kg/m<sup>3</sup>].

Viscosidade ( $\mu_h$ ) [Pa·s].

Condutividade térmica ( $k_h$ ) [W/m·K].

Passo 9. Área da secção transversal do tubo ( $a_t$ ):

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

Passo 10. Velocidade do metanol no lado dos tubos ( $v_c$ ):

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

Passo 11. Número de Reynolds do metanol ( $Re_c$ ):

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

Passo 12. Número de Prandtl do metanol ( $Pr_c$ ):

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

Passo 13. Número de Nusselt do metanol ( $Nu_c$ ):

Conforme indicado por [10], o número de Nusselt depende do valor do número de Reynolds do fluido dentro do permutador de calor. Em consequência:

Região laminar ( $Re_c \leq 2,300$ ):

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

• Região Intermédia ( $2,300 < Re_c < 8,000$ ):

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

• Região Turbulenta ( $Re_c \geq 8,000$ ):

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

Passo 14. Coeficiente de transferência de calor por convecção para o metanol ( $h_c$ ):

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

Passo 15. Coeficiente de transferência de calor por convecção para o metanol com base na área da superfície exterior do tubo ( $h_{co}$ ):

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

Passo 16. Secção transversal do fluxo no invólucro ( ):

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

Passo 17. Velocidade da água no revestimento ( ):

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

Passo 18. Diâmetro hidráulico para troca de calor ( ):

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

Passo 19. Número de Reynolds da água ( $Re_h$ ):

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

Passo 20. Número de Prandtl da água ( $Pr_h$ ):

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

• - Passo 21: Número de Nusselt da água ( $Nu_h$ ):

• - Região laminar ( $Re_h \leq 2,300$ ):

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

• Região intermédia ( $2,300 < Re_h < 8,000$ ):

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

• Região Turbulenta ( $Re_h \geq 8,000$ ):

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

Passo 22. Coeficiente de transferência de calor por convecção para a água ( $h_h$ ):

$$h_h = \frac{\bar{Nu}_h \cdot k_h}{d_h} \quad (22)$$

Passo 23. Coeficiente global de transferência de calor (U):

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

• Diferença de temperatura média logarítmica (LMTD):

• - Para uma configuração em contracorrente:

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

Passo 25. Área de permuta de calor necessária (A\_req):

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

Passo 26 Comprimento do permutador de calor ( ):

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

### 2.3 Cálculo das perdas de carga.

Passo 27. Área da secção transversal do bocal do lado do tubo ( $a_{N(t)}$ ):

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

Passo 28. Velocidade do fluxo de metanol no bocal do lado do tubo ( $v_{N(c)}$ ):

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

Passo 29. Perda de pressão do bocal de metanol no lado da tubagem ( $\Delta p_{N(c)}$ ):

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

Passo 30. Fator de atrito do metanol ( $f_c$ ):

$$f_c = \frac{0,275}{Re_c^0,2} \quad (30)$$

Passo 31. Queda de pressão por fricção do metanol no lado da tubagem ( $\Delta p_{\{f(c)\}}$ ):

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

Passo 32. Perda de carga total de metanol no lado da tubagem ( $\Delta p_c$ ):

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

Passo 33. Área da seção transversal do bocal do lado do alojamento ( $a_{\{N(s)\}}$ ):

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

Passo 34. Velocidade do fluxo de água no bocal do lado da caixa ( $v_{\{N(h)\}}$ ):

$$v_{N(h)} = \frac{m_h}{3,600} \quad (34)$$

Passo 35. Queda de pressão através do bocal de água no lado do invólucro ( $\Delta p_{\{N(h)\}}$ ):

$$\Delta p_{N(h)} = 1,5 \cdot \frac{v_{N(h)}^2 \cdot \rho_h}{2} \quad (35)$$

Passo 36. Diâmetro hidráulico para a queda de pressão ( $d'_{h}$ ):

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

Passo 37. Número de Reynolds da água para a queda de pressão ( $Re'_{h}$ ):

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

Passo 38. Fator de fricção da água ( $f_h$ ):

$$f_h = \frac{0,275}{Re'^{0,2}_h} \quad (38)$$

Passo 39. Queda de pressão de fricção da água no lado do invólucro ( $\Delta p_{\{f(h)\}}$ ):

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

Passo 40. Queda de pressão total da água no lado do invólucro ( $\Delta p_h$ ):

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

### 3. Resultados

Os passos seguidos para determinar o comprimento necessário dos tubos e a perda de carga de ambos os fluidos, entre outros parâmetros importantes, são apresentados a seguir, com o objetivo de projetar o permutador de calor multitungular do ponto de vista termo-hidráulico.

#### 3.1. Comprimento dos tubos

##### Passo 1. Definição dos dados iniciais disponíveis:

- Vazão mássica de metanol ( $m_c$ ): 2.000 kg/h
- Vazão mássica de água ( $m_h$ ): 3.000 kg/h

- Temperatura de entrada do metanol ( $t_1$ ): 30 °C
- Temperatura de saída do metanol ( $t_2$ ): 60 °C
- Temperatura de entrada da água ( $T_1$ ): 90 °C
- Diâmetro interno da camisa ( $D_i$ ): 0,0721 m
- Diâmetro interno dos tubos ( $d_i$ ): 0,014 m
- Diâmetro externo dos tubos ( $d_e$ ): 0,016 m
- Diâmetro interno do bocal do lado dos tubos ( $d_N$ ): 0,032 m
- Diâmetro interno do bocal do lado da camisa ( $D_N$ ): 0,050 m
- Condutividade térmica do aço carbono ( $k_t$ ): 43 W/m·K [11]
- Espessura da parede do tubo ( $e_t$ ): 0,002 m
- Fator de incrustação do metanol ( $R_c$ ): 0,000352 K·m²/W [11]
- Fator de incrustação da água ( $R_h$ ): 0,000088 K·m²/W [11]
- Número de tubos ( $n$ ): 7
- Perda de pressão máxima permitida para o metanol ( $\Delta P_{\{c(a)\}}$ ): 3.500 Pa

- Perda de pressão máxima permitida para a água ( $\Delta P_{\{h(a)\}}$ ): 1.000 Pa

Passo 2. Temperatura média do metanol ( $\bar{t}$ ):

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

Passo 3. Parâmetros físicos do metanol à temperatura média determinada no passo 1:

Segundo [13], o metanol apresenta os seguintes valores para os parâmetros físicos solicitados:

Densidade ( $\rho_c$ ) = 770,12 kg/m³

Viscosidade ( $\mu_c$ ) = 0,000423 Pa·s

Capacidade calorífica ( $Cp_c$ ) = 2.657,53 J/kg·K

Condutividade térmica ( $k_c$ ) = 0,1943 W/m·K

Passo 4. Carga térmica (Q):

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

$$Q = \frac{2,000}{3,600} \cdot 2,657,53 \cdot (60 - 30)$$

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

Passo 5. Capacidade calorífica da água ( $Cp_h$ ) à temperatura de entrada da água ( $T_1$ ).

Segundo o referido em [13], a capacidade calorífica da água a 90 °C é 4.205,21 J/kg·K.

Passo 6. Temperatura de saída da água ( $T_2$ ):

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



$$T_2 = 90 - \frac{44,292.17}{\frac{3,000}{3,600} \cdot 4,205.21}$$

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

Passo 7. Temperatura média da água ( $\bar{T}$ ):

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

(4)

16 convecção para o metanol baseado na área externa do tubo Secção transversal do fluxo na carcassa Velocidade da água na carcassa  $a_{shell}$  0.00267  $\text{m}^2$

Passo 8. Parâmetros físicos da água à temperatura média determinada no passo 6:

De acordo com [14], a água apresenta os valores dos parâmetros físicos indicados a seguir, à temperatura média de 83,68 °C.

Densidade ( $\rho_h$ ) = 969,46 kg/m³.

Viscosidade ( $\mu_h$ ) = 0,000339 Pa·s.

Condutividade térmica ( $k_h$ ) = 0,6721 W/m·K.

A Tabela 1 apresenta os valores dos parâmetros calculados nos passos 9-26.

Tabela 1. Resultados dos parâmetros calculados nos passos 9-26.

Passo	Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade
9	Área da seção transversal do tubo	$a_t$	0.001077	$\text{m}^2$
10	Velocidade do metanol no lado dos tubos	$v_c$	0.670	$\text{m/s}$
11	Número de Reynolds do metanol <sup>1</sup>	$Re_c$	17,077.3 <sub>6</sub>	-
12	Número de Prandtl do metanol	$Pr_c$	5.78	-
13	Número de Nusselt do metanol <sup>2</sup>	$Nu_c$	99.56	-
14	Coeficiente de transferência de calor por convecção para o metanol	$h_c$	1,381.75	$\text{W/m}^2\text{.K}$
15	Coeficiente de transferência de calor por	$h_{co}$	1,209.03	$\text{W/m}^2\text{.K}$

16	convecção para o metanol baseado na área externa do tubo Secção transversal do fluxo na carcassa Velocidade da água na carcassa $a_{shell}$ 0.00267 $\text{m}^2$	$v_h$	0.322	$\text{m/s}$
17	Número de Reynolds da água <sup>3</sup>	$Re_h$	27,993.6 <sub>6</sub>	-
18	Número de Prandtl da água	$Pr_h$	2.12	-
19	Número de Nusselt da água <sup>4</sup>	$Nu_h$	106.43	-
20	Coeficiente de transferência de calor por convecção para a água	$h_h$	2,353.01	$\text{W/m}^2\text{.K}$
21	Coeficiente global de transferência de calor	$U$	575.17	$\text{W/m}^2\text{.K}$
22	Diferença de temperatura média logarítmica	$LMTD$	38.02	$^\circ\text{C}$
23	Área requerida de troca de calor	$A_{req}$	2.025	$\text{m}^2$
24	Comprimento do trocador de calor	$L$	5.76	m

Dado que  $[\text{Re}]_c > 8.000$ , o metanol fluirá em regime turbulento dentro do trocador de calor.

Dado que  $[\text{Re}]_c > 8.000$ , a equação utilizada para determinar o número de Nusselt do metanol foi a número (11).

Dado que  $[\text{Re}]_h > 8.000$ , a água fluirá em regime turbulento dentro do trocador de calor.

Dado que  $[\text{Re}]_h > 8.000$ , foi utilizada a equação (21) para determinar o número de Nusselt da água.

Fonte: Elaboração própria

### 3.2. Quedas de pressão.

A Tabela 2 apresenta os resultados dos parâmetros calculados nos passos 27-40.

Tabela 2. Resultados dos parâmetros calculados nos passos 27-40.

Passo	Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidades
27	Área da secção transversal do bocal do lado dos tubos	$a_{N(t)}$	0.00080	$\text{m}^2$
28	Velocidade de fluxo de metanol no bocal do lado dos tubos	$v_{N(c)}$	0.902	$\text{m/s}$
29	Queda de pressão no bocal do metanol no lado dos tubos	$\Delta p_{N(c)}$	469.93	$\text{Pa}$
30	Fator de atrito do metanol	$f_c$	0.0392	-
31	Queda de pressão por atrito do metanol no lado dos tubos	$\Delta p_{f(c)}$	2.787.73	$\text{Pa}$
32	Queda de pressão total do metanol no lado dos tubos	$\Delta p_c$	3.257.66	$\text{Pa}$
33	Área da secção transversal do bocal do lado da carcaça	$a_{N(s)}$	0.00196	$\text{m}^2$
34	Velocidade de fluxo de água no bocal do lado da carcaça	$v_{N(h)}$	0.438	$\text{m/s}$
35	Queda de pressão no bocal da água no lado da carcaça	$\Delta p_{N(h)}$	139.49	$\text{Pa}$
36	Diâmetro hidráulico para a queda de pressão	$d'_{h}$	0.0185	$\text{m}$
37	Número de Reynolds da água para a queda de pressão	$Re'_{h}$	17.035.61	-

38	Fator de atrito da água	$f_h$	0.0392	-
39	Queda de pressão por atrito da água no lado da carcaça	$\Delta p_{f(h)}$	613.39	$\text{Pa}$
40	Queda de pressão total da água no lado da carcaça	$\Delta p_h$	752.88	$\text{Pa}$

Fuente: Elaboración propia

### 4. Discussão

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 1, a velocidade do metanol no lado dos tubos foi de 0,670 m/s, o que é 2,08 vezes maior que a velocidade da água na carcaça; isto deve-se ao menor valor da densidade do metanol (770,12 kg/m<sup>3</sup>) e da área da secção transversal do tubo (0,001077 m<sup>2</sup>) comparativamente à densidade da água (969,46 kg/m<sup>3</sup>) e à área da secção transversal do fluxo na carcaça (0,00267 m<sup>2</sup>).

O número de Reynolds da água (27.993,66) é 1,64 vezes maior que o número de Reynolds do metanol (17.077,36), devido ao maior valor da densidade da água (969,46 kg/m<sup>3</sup>) e do diâmetro hidráulico para a troca de calor (0,0304 m), bem como ao menor valor da viscosidade da água (0,000339 Pa·s) relativamente aos valores da densidade do metanol (770,12 kg/m<sup>3</sup>), do diâmetro interno do tubo (0,014 m) e da viscosidade do metanol (0,000423 Pa·s). É importante destacar que ambos os fluidos fluem em regime turbulento, pois ambos os números de Reynolds estão acima de 8.000 [10].

O coeficiente convectivo de transferência de calor da água (2.353,01 W/m<sup>2</sup>·K) é 1,70 vezes maior que o coeficiente convectivo para o metanol (1.381,75 W/m<sup>2</sup>·K), principalmente porque o número de Nusselt (106,43) e a condutividade térmica (0,6721 W/m·K) da água são superiores ao número de Nusselt (99,56) e à condutividade térmica (0,1943 W/m·K) do metanol.

A carga térmica foi de 44.292,17 W, enquanto a temperatura de saída calculada da água foi de 77,36 °C. O valor do coeficiente global de transferência de calor foi de 575,17 W/m<sup>2</sup>·K, concordando com os valores reportados por [4] e [11], enquanto a diferença de temperatura média logarítmica foi de 38,02 °C. O permutador de calor multitungo desenhado necessitará de uma área de troca térmica de 2,025 m<sup>2</sup>, valor que corresponde aos reportados por [4] para este tipo de permutadores, requerendo assim um comprimento total de 5,76 m, que pode ser considerado adequado [3]. Em [10] foi desenhado um permutador multitungo e os resultados para a área de troca térmica e o comprimento total do tubo foram 1,01 m<sup>2</sup> e 2,90 m, respectivamente.



A queda de pressão no bocal do metanol do lado dos tubos (469,93 Pa) é 3,37 vezes maior que a queda de pressão no bocal da água do lado da carcaça (139,49 Pa), devido ao facto de a velocidade de fluxo do metanol no bocal do lado dos tubos (0,902 m/s) ser quase o dobro da velocidade de fluxo da água no bocal do lado da carcaça (0,438 m/s). Isto ocorre porque o diâmetro interno do bocal do lado dos tubos (0,032 m) é menor que o diâmetro interno do bocal do lado da carcaça (0,050 m), resultando numa área de secção transversal menor para o bocal do lado dos tubos (0,00080 m<sup>2</sup>) em comparação com a área do bocal do lado da carcaça (0,00196 m<sup>2</sup>), o que influencia o maior valor obtido para a velocidade do metanol no bocal do lado dos tubos em comparação com a velocidade da água no bocal do lado da carcaça. Por outro lado, a queda de pressão por atrito do metanol no lado dos tubos (2.787,73 Pa) é 4,54 vezes maior que a queda de pressão por atrito da água no lado da carcaça (613,39 Pa), pois a velocidade do metanol no lado dos tubos (0,670 m/s) é maior e o diâmetro interno dos tubos (0,014 m) é menor que a velocidade da água na carcaça (0,322 m/s) e o diâmetro hidráulico para a queda de pressão (0,0185 m), respetivamente. Importa mencionar que o valor do fator de atrito do metanol é igual ao fator de atrito da água, ambos com valor de 0,0392, o que é um resultado interessante.

A discussão anterior explica porque a queda total de pressão do metanol no lado dos tubos (3.257,66 Pa) é 4,32 vezes maior que a queda total de pressão da água no lado da carcaça (752,88 Pa), já que tanto a queda de pressão no bocal do metanol do lado dos tubos como a queda de pressão por atrito do metanol no lado dos tubos são superiores à queda de pressão no bocal da água do lado da carcaça e à queda de pressão por atrito da água no lado da carcaça, respetivamente. Este resultado está em concordância com o reportado por [10].

A Figura 2 apresenta o esquema do permutador multitungo desenhado (MTHE), com os seus principais parâmetros de projeto e a informação numérica dos dois fluxos.

Fig. 2. Esquema do MTHE desenhado.

Fonte: Elaboração própria.

## 5. Conclusões

Foi desenhado um permutador de calor multitungo do ponto de vista termo-hidráulico, para aquecer um fluxo de metanol a 60 °C utilizando condensado de água a 90 °C. A metodologia de cálculo empregue neste estudo para o design do MTHE foi a reportada por [10]. Foram determinados vários parâmetros importantes de projeto, tais como a diferença de temperatura média logarítmica (38,02 °C), o coeficiente global de transferência de calor (575,17 W/m<sup>2</sup>·K), a área requerida para a troca térmica (2,025 m<sup>2</sup>), assim como os números de Reynolds, Prandtl e Nusselt e os coeficientes de transferência convectiva para ambos os fluidos. Também foram calculadas as quedas de pressão dos dois fluxos, cujos valores estão abaixo dos limites máximos

estabelecidos pelo serviço de troca térmica. O permutador de calor multitungo desenhado terá um comprimento total de 5,76 m.

## 6.- Author Contributions.

1. Conceptualização: Amaury Pérez Sánchez.
2. Curadoria de dados: Zamira María Sarduy Rodríguez.
3. Análise formal: Amaury Pérez Sánchez, Arlenis Cristina Alfaro Martínez.
4. Obtenção de financiamento: Not applicable.
5. Investigação: Amaury Pérez Sánchez, Arlenis Cristina Alfaro Martínez, Zamira María Sarduy Rodríguez.
6. Metodologia: Amaury Pérez Sánchez, Elizabeth Ranero González.
7. Gestão do projeto: Not applicable.
8. Recursos: Not applicable.
9. Software: Not applicable.
10. Supervisão: Amaury Pérez Sánchez.
11. Validação: Amaury Pérez Sánchez, Eddy Javier Pérez Sánchez.
12. Visualização: Not applicable.
13. Redação – rascunho original: Elizabeth Ranero González, Eddy Javier Pérez Sánchez.
14. Redação – revisão e edição: 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://asrjtsjournal.org/index.php/American\\_Scientific\\_Journal/article/view/7324](https://asrjtsjournal.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.spxfollow.com/assets/original/apv-he-multipipe-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. Simott 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. Bunker, "Numerical investigation of heat transfer enhancement in a multitungo 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 Multitungo 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. Gbadamosi, *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. Pramuanjaroenkit, *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] ChemicaLogic, "Thermodynamic and Transport Properties of Water and Steam," Version 2.0 Burlington, USA: ChemicaLogic Corporation, 2003.

### Nomenclature

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

$\Delta p_{N(c)}$	Nozzle pressure drop of cold fluid in the tube side	$\text{Pa}$
$\Delta p_{N(h)}$	Nozzle pressure drop of hot fluid in the shell side	$\text{Pa}$
$Q$	Heat duty	$\text{W}$
$R$	Fouling factor	$\text{K.m}^2/\text{W}$
$Re$	Reynolds number	-
$Re'$	Reynolds number for pressure drop	
$t$	Temperature of the cold fluid	$^{\circ}\text{C}$
$\bar{t}$	Average temperature of the cold fluid	$^{\circ}\text{C}$
$T$	Temperature of the hot fluid	$^{\circ}\text{C}$
$\bar{T}$	Average temperature of the hot fluid	$^{\circ}\text{C}$
$U$	Overall heat transfer coefficient	$\text{W/m}^2.\text{K}$
$v$	Velocity	$\text{m/s}$
$v_{N(c)}$	Flow velocity of cold fluid in the tube-side nozzle	$\text{m/s}$
$v_{N(h)}$	Flow velocity of hot fluid in the shell-side nozzle	$\text{m/s}$

### Greek symbols

$\rho$	Density	$\text{kg/m}^3$
$\mu$	Viscosity	$\text{Pa.s}$

### Subscripts

1	Inlet
2	Outlet
<i>c</i>	Cold fluid (methanol)
<i>h</i>	Hot fluid (water)



## Projeto termo-hidráulico de um permutador de calor de duplo tubo aletado para arrefecimento de acetona.

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

Amaury Pérez Sánchez <sup>1</sup> \*; Elizabeth Elianne Artigas Cañizares <sup>2</sup>; Laura Thalia Alvarez Lores <sup>3</sup>; Elizabeth Ranero González <sup>4</sup> & Eddy Javier Pérez Sánchez <sup>5</sup>

Recebido: 21/11/2024 – Aceite: 03/02/2025 – Publicado: 01/07/2025

Artigos de  
Investigação

Artigos de  
Revisão

Artigos de  
Ensaio

\* Autor para correspondência.



### Resumo.

Os permutadores de calor de duplo tubo aletado em contracorrente são considerados altamente eficazes, valiosos e vantajosos na indústria de transferência de calor. No presente artigo, foi projetado um permutador de calor de duplo tubo aletado aplicando uma metodologia de projeto amplamente reconhecida, com o objetivo de arrefecer 2 kg/s de uma corrente de acetona desde 90 °C até 30 °C, utilizando água fria disponível a 5 °C. Diversos parâmetros de projeto importantes foram determinados, tais como o fator de depuração e o número de serpentinas, bem como a queda de pressão e potência de bombagem de ambas as correntes, entre outros. A carga térmica apresentou um valor de 276 030 W, sendo necessário um caudal mássico de água fria de 3,30 kg/s para arrefecer a corrente de acetona. Ambos os fluidos circularão em regime turbulento no interior do permutador de calor. O valor do fator de depuração foi de 0,359, sendo necessárias aproximadamente três serpentinas. A queda de pressão de ambos os fluidos encontra-se abaixo do valor máximo estabelecido pelo serviço de transferência de calor, enquanto as correntes de água fria e acetona necessitarão de uma potência de bombagem de 3 662 W e 575 W, respectivamente.

### Palavras-chave.

Permutador de calor de duplo tubo, tubo aletado, número de serpentinas, queda de pressão, potência de bombagem.

### 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 fria 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 mássico de agua fria 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 fria y acetona necesitarán una potencia de bombeo de 3 662 W y 575 W, respectivamente.

### Palabras clave.

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

### 1. Introdução

Com o desenvolvimento do conhecimento técnico, a importância da engenharia de transferência de calor tem aumentado, havendo uma necessidade constante de enfrentar novos desafios de design para melhorar o desempenho e a eficácia no campo da transferência de calor, especialmente devido ao interesse na poupança de energia. Geralmente, os permutadores de calor são amplamente utilizados para este fim [1].

Os permutadores de calor são dispositivos utilizados em inúmeras indústrias para a transferência de calor entre fluidos. Dos vários tipos de permutadores de calor utilizados à escala industrial, possivelmente os dois mais importantes são o permutador de tubo duplo e o de carcassa e tubos. Apesar de os permutadores de calor de carcassa e tubos geralmente oferecerem uma maior área de transferência de calor, um design mais compacto, maior facilidade de limpeza e menor probabilidade de fugas, o permutador de calor de tubo duplo

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

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

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

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

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

.de tubo duplo (DPHE, na sigla em inglês) ainda é utilizado na prática atualmente [2].

Um dos permutadores de calor que tem atraído a atenção de investigadores e engenheiros é o DPHE, devido à sua simplicidade, eficácia e amplo leque de aplicações [3].

Um DPHE (permutterador de calor de tubo duplo) é um tipo distinto de permutador de calor composto por dois tubos concêntricos, um dentro do outro. Num DPHE existem dois fluxos de fluidos diferentes, sendo que um fluido circula pelo interior do tubo interno e o outro fluido circula pela região anular situada entre o exterior do tubo interno e o interior do tubo externo [4].

Este sistema é constituído por dois tubos concêntricos, duas ligações em T, uma cabeça de retorno, uma alimentação de retorno e juntas de vedação que mantêm o tubo interior no interior do tubo exterior (Figura 1). Cada um dos dois fluidos — quente e frio — flui pelo interior do tubo interno, quer pelo anel anular formado entre o exterior do tubo interno e o interior do tubo externo [2].

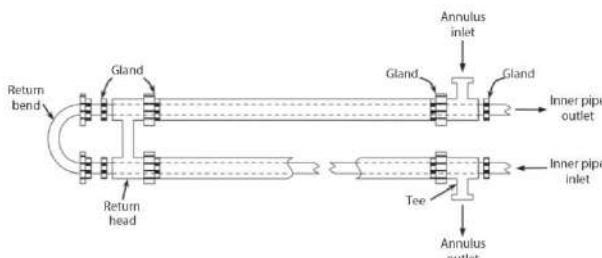


Fig. 1. Permutador de calor de tubo duplo.

Fonte: [2].

Os DPHE têm sido utilizados na indústria de processamento químico há mais de 100 anos. A primeira patente desta unidade surgiu em 1923 [2]. São aplicados em vários processos industriais e áreas de investigação; por exemplo, na recuperação de calor residual, para aquecimento/arrefecimento em processos químicos, bem como na indústria alimentar para pasteurizar ou pré-aquecer produtos líquidos (sumos, purés, geleias, etc.).

O DPHE é particularmente conveniente porque pode ser montado em qualquer oficina de canalização utilizando peças padrão e oferece uma superfície de transferência de calor econômica. A disposição do escoamento neste permutador de calor pode ser em contracorrente ou em paralelo (co-corrente). Na disposição em contracorrente, o fluido no tubo flui em sentido oposto ao fluido no anel anular. Na disposição em paralelo, ambos os fluidos escoam na mesma direção. As variações de temperatura do fluido dentro do permutador de calor dependem do tipo de escoamento, se paralelo ou em contracorrente [2].

A aplicação principal do DPHE é para o aquecimento ou arrefecimento sensível de fluidos de processo onde são necessárias áreas pequenas de transferência de calor (até 50

$\text{m}^2$ ). Este permutador de calor é também muito adequado para lidar com fluidos a alta pressão, devido ao menor diâmetro dos tubos. A principal desvantagem é que são volumosos e dispendiosos por unidade de superfície de transferência de calor [5].

Embora esta unidade não seja amplamente utilizada na indústria (a superfície de transferência de calor é pequena em comparação com outros permutadores), representa um excelente ponto de partida do ponto de vista acadêmico e/ou de formação [2].

Segundo [6], se a corrente contiver sólidos em suspensão, os DPHE podem também ser uma melhor alternativa, pois podem ser construídos com um tubo interior de maior diâmetro para evitar obstruções. Os diâmetros mais pequenos do tubo exterior nos DPHE são eficazes para aplicações a alta pressão, uma vez que requerem uma menor espessura de parede. Além disso, os DPHE podem ser facilmente limpos e o escoamento longitudinal evita a existência de regiões de estagnação, que nos permutadores de carcassa e tubos podem provocar incrustações e corrosão. Os DPHE têm ainda a vantagem da sua robustez graças à sua estrutura modular, o que permite uma adaptação mais simples a alterações no processo.

A crescente necessidade de desenvolver e melhorar a eficácia dos permutadores de calor deu origem a uma vasta gama de investigações com o objetivo de aumentar a taxa de transferência de calor e, simultaneamente, reduzir o tamanho e o custo do equipamento industrial [3]. A melhoria da transferência de calor tornou-se um fator importante para alcançar estes objetivos e tem captado o interesse de muitos investigadores [7].

A melhoria da transferência de calor em permutadores pode ser alcançada através de duas técnicas [7]:

Aumento do coeficiente de convecção.

O coeficiente de convecção pode ser melhorado aumentando a turbulência, criando escoamento secundário e induzindo escoamento rotativo. Um ou mais destes mecanismos podem ser conseguidos através da utilização de fio espiral, aletas, entalhes, ranhuras em espiral, tubos com nervuras transversais, tubos com ranhuras helicoidais, inserções de fio espiral, fitas torcidas, paredes com canais ou ranhuras. Também é possível melhorar o coeficiente de convecção utilizando fluidos que sofrem uma transição de fase ou através de técnicas de melhoria electrohidrodinâmica e do uso de escoamento em forma de neblina.

Expansão da área de transferência de calor através da utilização de aletas longitudinais ou permutadores de calor com fio sobre o tubo.



Outras técnicas aplicam ambos os efeitos. Exemplos destas técnicas são as aletas ou nervuras em espiral e as aletas de tira deslocadas (offset strip fins).

Segundo [4], o desempenho dos permutadores de calor pode ser melhorado através da adoção de procedimentos adequados. Estes procedimentos incluem a implementação de superfícies estendidas, vibração da superfície, superfícies rugosas e tubos espiralados. Outros autores [7] investigaram numericamente o efeito da inserção de substratos porosos em ambos os lados da parede que separa os fluidos de trabalho quente e frio sobre o desempenho de um permutador de calor convencional de tubos concêntricos.

Atualmente, os sistemas térmicos encontram-se entre os sistemas técnicos mais dinâmicos. Têm sido explorados e testados inúmeros métodos com o objetivo de aumentar a transferência de calor nestes sistemas e alcançar um elevado nível de desempenho térmico. Ao recorrer a várias abordagens baseadas na melhoria das superfícies, pode aumentar-se a taxa de transferência de calor dos permutadores de calor convencionais. Esta melhoria na taxa de transferência de calor deve-se às condições geradas pelo uso de superfícies melhoradas. Estas condições evitam a formação da camada limite, aumentam o nível de turbulência, ampliam a área de transferência de calor e geram fluxos rotativos e/ou fluxos secundários.

As superfícies de transferência de calor melhoradas têm vários objetivos, sendo o mais importante a redução do tamanho dos permutadores de calor, o que pode traduzir-se numa diminuição dos seus custos. Além disso, reduzem a potência de bombagem necessária para determinados processos de troca térmica e melhoram o coeficiente de transferência de calor. Por sua vez, isto aumenta a eficácia e a eficiência dos processos térmicos e traduz-se em poupanças nos custos operacionais [8].

Recentemente, vários investigadores estudaram formas de melhorar a transferência de calor por meios passivos em permutadores de calor de tubo duplo (DPHE), como o uso de fitas torcidas, superfícies estendidas ou aletas, espirais de fio e outras ferramentas geradoras de turbulência [9].

A utilização de aletas sólidas para aumentar a taxa de transferência de calor entre dois fluidos diferentes em permutadores de calor tubulares é uma das abordagens mais bem-sucedidas e amplamente aplicadas. Os tubos aletados são um dos métodos mais frequentemente utilizados para melhorar de forma passiva a transferência de calor em tubos circulares. Aplicam-se para reduzir o tamanho do permutador necessário para uma determinada carga térmica, ou para aumentar a taxa de transferência de calor num design de permutador já existente. Um tubo com aletas internas pode aumentar substancialmente a área superficial e, com isso, melhorar significativamente a taxa de transferência de calor.

Os tubos aletados comportam-se de forma diferente consoante o escoamento seja laminar ou turbulento. Para ambos os regimes de escoamento — laminar e turbulento — os tubos aletados apresentam coeficientes de transferência de calor significativamente superiores em comparação com os tubos lisos correspondentes. O desempenho de um tubo aletado depende principalmente do tipo de escoamento, da eficiência das aletas (que determina o coeficiente médio de transferência de calor) e do fator de fricção, que é responsável pela perda de pressão ou de energia de bombagem [10].

A utilização de tubos aletados para aumentar a transferência de calor está a ganhar cada vez mais importância num número crescente de aplicações industriais; por isso, o tubo aletado tem sido objeto de vários estudos [8]. Neste contexto, [9] investigou a transferência de calor por convecção num permutador de calor de tubo duplo em contracorrente com uma aleta retangular curva e uma aleta retangular em escoamento turbulento, utilizando nanofluidos de água-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e água-TiO<sub>2</sub>.

Além disso, em [11] foi estudada a melhoria do desempenho térmico de materiais de mudança de fase num permutador de calor de tubo duplo, através da utilização de novas aletas anulares tipo grelha. Nesse estudo, as aletas anulares tipo grelha, compostas por componentes retos e tiras circulares, foram colocadas sobre o tubo interior.

Noutro estudo, [8] realizou uma investigação numérica da melhoria da transferência de calor num permutador de calor de tubo duplo com superfície estendida na parte exterior do tubo interior, adicionando nanofluidos de alumina e utilizando simulação por dinâmica de fluidos computacional (CFD). Esta investigação foi conduzida para números de Reynolds entre 250 e 2.500, com um diâmetro interior de 20,4 mm. Também foi analisado o efeito da geometria das aletas em forma de U do tubo interior sobre a queda de pressão, a distribuição da temperatura e o desempenho térmico.

Do mesmo modo, [12] realizou uma análise numérica da melhoria da transferência de calor num permutador de calor de tubo duplo com aletas anulares dentadas individuais, concluindo que o número máximo de Nusselt e o coeficiente máximo de fricção na parede foram obtidos com 14 aletas dentadas.

Por outro lado, [4] estudou as características da transferência de calor por convecção na região anular de um DPHE com aletas inovadoras em forma de diamante. As aletas com forma de diamante são distribuídas longitudinalmente sobre a superfície exterior do tubo interior do DPHE. A disposição do anel com aletas em forma de diamante foi avaliada considerando diversos

valores dos parâmetros geométricos, como a razão entre os raios, o número de aletas, a altura e a espessura das aletas.

Foram calculados os efeitos destas variáveis sobre diferentes parâmetros de desempenho, tais como o produto do número de Reynolds e o fator de fricção, o número de Nusselt e o fator  $j$ . O tipo de aleta avaliado neste estudo foi considerado pela primeira vez no design de um DPHE.

Em [10], foi descrita uma metodologia simples, semiempírica e numérica, para avaliar as características de transferência de calor e queda de pressão num permutador de calor de tubos aletados com aletas internas e/ou externas, a qual pode ser aplicada numa ampla gama de condições operacionais de relevância prática. Em [3], foi estudado numericamente o desempenho termo-hidráulico de um design proposto de permutador de calor de tubo duplo arágua com aletas helicoidais no lado gasoso do anel. Foram realizadas simulações CFD tridimensionais utilizando o software FLUENT com o objetivo de examinar o escoamento do fluido no lado do gás, a turbulência, a transferência de calor e o consumo energético para diferentes configurações do permutador de calor.

Além disso, [13] realizou diversas experiências para investigar e comparar a transferência de calor num DPHE com escoamento em contracorrente, com e sem a utilização de aletas triangulares longitudinais. Neste estudo foram utilizadas aletas triangulares com dimensões de 9 mm de base, 8 mm de altura e 2 mm de espessura.

Outros autores [6] investigaram a otimização do design de um DPHE utilizando programação matemática. A área do permutador de calor foi reduzida e foram considerados os ajustes termo-fluidodinâmicos necessários para aplicar corretamente as equações de transporte, juntamente com condições de design como as quedas de pressão máximas permitidas e a área excedente mínima. Também foram consideradas a estrutura modular deste tipo de permutador e a distribuição das correntes (dentro do tubo interior ou no anel). Adicionalmente, foram propostos dois métodos de programação inteira mista não linear (MINLP, na sigla em inglês).

De forma semelhante, [14] teve como objetivo desenvolver novos designs de DPHE para melhorar os processos de aquecimento/arrefecimento com a menor potência de bombagem possível. Consequentemente, foi realizada uma análise do desempenho térmico de três configurações de DPHE: DPHE circular ondulado, DPHE oval liso e DPHE oval ondulado. Além disso, o DPHE convencional foi utilizado como permutador de referência, tendo sido aplicado um modelo CFD validado para a realização do estudo.

Em [15], foi examinado experimentalmente o efeito das aletas helicoidais no desempenho de um DPHE água-ar. O

desempenho foi avaliado e comparado em termos de taxa média de transferência de calor, coeficiente de transferência de calor e eficácia do permutador de calor num tubo interior liso (sem aleta helicoidal) versus um permutador com aletas helicoidais instaladas sobre o tubo interior.

Em [1], foi investigada a análise da transferência de calor por convecção laminar totalmente desenvolvida num design inovador de DPHE aletado com aletas longitudinais de espessura variável na extremidade, sujeito a condições de fronteira de taxa constante de transferência de calor. Neste estudo, o desempenho global do DPHE proposto foi avaliado tendo em conta o fator de fricção, o número de Nusselt e o fator  $j$ . Por fim, [16] teve como objetivo comparar as características de transferência de calor utilizando diferentes perfis de aletas para um DPHE sob várias condições operacionais, com o intuito de identificar a melhor configuração possível. As configurações selecionadas neste estudo foram: retangular, triangular e parabólica côncava. A largura da base, a altura e o número de aletas foram mantidos constantes para permitir uma comparação precisa. A simulação numérica foi realizada utilizando um software comercial de CFD. Foram comparados e apresentados vários parâmetros específicos de transferência de calor, como a variação de temperatura, a taxa de transferência de calor, o coeficiente de transferência de calor e a eficácia das aletas para os modelos analisados.

A adição de material poroso como método alternativo para melhorar a troca térmica nestes equipamentos térmicos parece ser uma opção promissora. Neste sentido, [17] investigou a melhoria da transferência de calor através da colocação de aletas porosas no cilindro interior de um DPHE. Esta disposição foi selecionada com o objetivo de aumentar a área de superfície de transferência de calor entre as aletas e o fluido frio que deve ser aquecido. Também foi estudada a influência de vários parâmetros, como o número de Darcy, a altura e o espaçamento das aletas, e a razão de condutividade térmica, sobre os campos hidrodinâmico e térmico.

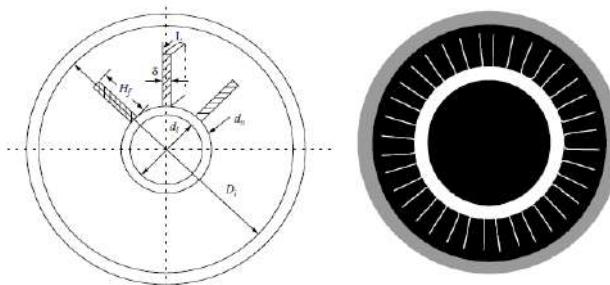
Numa planta de processamento químico é produzida acetona líquida, e pretende-se arrefecer esta corrente de acetona de 90 °C para 30 °C utilizando água refrigerada disponível a 5 °C. Para realizar esta operação de troca térmica, foi proposto um permutador de calor de tubo duplo com aletas, devido à disponibilidade de espaço e ao orçamento limitado. Assim, o presente trabalho teve como objetivo projetar um DPHE com tubos aletados, tanto do ponto de vista térmico como hidráulico, utilizando a metodologia e as correlações reportadas em [5] e [18], onde foram determinados vários parâmetros de design importantes, como o fator de limpeza, o número total de horquillas (hairpins), bem como a queda de pressão e a potência de bombagem de ambas as correntes.

## 2. Materiais e métodos

### 2.1. Definição do problema

É necessário arrefecer um caudal de acetona de 2 kg/s desde os 90 °C até aos 30 °C, utilizando água refrigerada a 5 °C. A temperatura de saída da água refrigerada não deve ultrapassar os 25 °C. Dispõe-se dos seguintes parâmetros iniciais (Figura 2):

- Comprimento da horquilla ( $L_h$ ): 4,2 m
- Diâmetro nominal do anel: 2 polegadas
- Diâmetro nominal do tubo interior:  $\frac{3}{4}$  de polegada
- Altura da aleta ( $H_f$ ): 0,0125 m
- Espessura da aleta ( $\delta$ ): 0,9 mm
- Número de aletas por tubo ( $N_f$ ): 28
- Material: Aço carbono
- Condutividade térmica do aço carbono ( $k_m$ ): 52 W/m·K [5]
- Número de tubos dentro do anel ( $N_t$ ): 1



- Fig. 2. Secção transversal de um permutador de calor com tubo interior aletado longitudinalmente e nomenclatura dos parâmetros iniciais.
- Fonte: [5].
- Segundo [5], os fatores de incrustação para a acetona e para a água são 0,000352 e 0,000176 m<sup>2</sup>·K/W, respectivamente. Prefere-se que ambas as correntes escoem em regime de contracorrente no permutador de calor projetado, enquanto a queda de pressão da acetona e da água refrigerada não deve exceder os 200.000 Pa e 900.000 Pa, respectivamente. Deve calcular-se a área de superfície e o número de horquillas (hairpins) do permutador de calor, bem como as quedas de pressão e a potência de bombagem para ambas as correntes.
- 2.2. Número de horquillas
- Passo 1. Definição dos parâmetros iniciais.
- Passo 2. Diâmetros do tubo interior e do anel.
- Passo 3. Temperatura média de ambos os fluidos:
- Fluido quente:

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

- Fluido frio:

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

Passo 4. Propriedades físicas de ambos os fluidos à temperatura média do passo anterior.

A Tabela 1 apresenta as propriedades físicas que devem ser definidas para ambos os fluidos à temperatura média calculada no passo anterior.

Tabela 1. Propriedades físicas de ambos os fluidos

Propriedade física	Acetona	Água refrigerada	Unidades
Densidade	$\rho_h$	$\rho_c$	kg/m <sup>3</sup>
Viscosidade	$\mu_h$	$\mu_c$	Pa.s
Condutividade térmica	$k_h$	$k_c$	W/m.K
Capacidade térmica	$Cp_h$	$Cp_c$	J/kg.K

Fuente: Elaboração própria.

Passo 5. Carga térmica ( $Q$ ):

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

Passo 6: Caudal mássico da água refrigerada ( $m_c$ ):

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

Passo 7. Localização dos fluidos no interior do permutador de calor.

Passo 8. Secção transversal líquida no espaço anular com tubos alhetados longitudinalmente ( $A_c$ ):

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

Passo 9. Perímetro molhado total do anel com tubos interiores com alhetas longitudinais ( $P_w$ ):

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

Passo 10. Diâmetro hidráulico ( $D_h$ ):

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

Passo 11. Perímetro de transferência de calor do anel de transferência de calor ( $P_h$ ):

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

Passo 12. Diâmetro equivalente para a transferência de calor ( $D_e$ ):

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

Passo 13. Velocidade do fluido do lado do tubo ( $u_t$ ):

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



Passo 14. Número de Reynolds do fluido do lado do tubo (  $[\text{Re}]_t$  ):

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

Passo 15. Número de Prandtl do fluido do lado do tubo (  $[\text{Pr}]_t$  ):

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

Número de Nusselt do fluido do lado do tubo ( ):

Regime laminar (  $[\text{Re}]_t < 2,300$  ):

Temperatura da parede do tubo (  $T_w$  ):

$$T_w = 0.5 \cdot (T_t - t_w) \quad (13)$$

Viscosidade do fluido do lado do tubo (  $\mu_t$  ) e da água (  $\mu_w$  ) em  $T_w$  .

Número de Nusselt do fluido do lado do tubo em fluxo laminar:

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

• Regime de transição (  $2,300 \leq Re_t \leq 10,000$  ):

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

• Regime turbulento (  $10,000 < Re_t < 5,000,000$  ):

Fator de atrito (  $f_t$  ):

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

Número de Nusselt (  $Nu_t$  ):

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

Passo 17. Coeficiente de transferência de calor por convecção do fluido do lado do tubo ( ):

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

Passo 18. Velocidade do fluido anular (  $u_a$  ):

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

Passo 19. Número de Reynolds do fluido anular (  $Re_a$  ):

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

Passo 20. Número de Prandtl do fluido anular (  $Pr_a$  ):

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

Passo 21. Número de Nusselt do fluido anular (  $Nu_a$  ):

• Regime laminar (  $Re_a < 2,300$  ):

Viscosidade do fluido anular (  $\mu_a$  ) at  $T_w$  .

Número de Nusselt do fluido anular:

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

• Regime de transição (  $2,300 \leq Re_a \leq 10,000$  ):

$$\frac{h_t}{Cp_a \cdot \rho_a \cdot u_a} = 0.116 \cdot \left( \frac{Re_a^{0.66} - 125}{Re_a} \right) \cdot \left[ 1 + \left( \frac{D_h}{L_t} \right)^{0.66} \right] \cdot Pr_a^{0.6} \quad (23)$$

• Regime turbulento (  $10,000 < Re_a < 5,000,000$  ):

Fator de atrito (  $f_a$  ):

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

Número Nusselt (  $Nu_a$  ):

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

Passo 22. Coeficiente de transferência de calor por convecção do fluido anular (  $h_a$  ):

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

Passo 23. Área de transferência de calor com alhetas (  $A_f$  ):

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

Passo 24. Área de transferência de calor sem alhetas (  $A_u$  ):

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

Passo 25. Área total da forquilha (  $A_t$  ):

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

Passo 26. Fator m:

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

Passo 27. Eficiência das alhetas (  $\eta_f$  ):

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

Passo 28. Eficiência global da superfície (  $\eta_o$  ):

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

Passo 29. Área da câmara de ar (  $A_i$  ):

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

Passo 30. Coeficiente global de transferência de calor em condições de incrustação (  $U_f$  ):



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

Passo 31. Coeficiente global de transferência de calor em condições limpas ( $U_c$ ):

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

Passo 32. Fator de limpeza ( $CF$ ):

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

Passo 33. Diferença de temperatura média logarítmica (LMTD) (para fluxo em contracorrente):

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

Passo 34. Superfície total de transferência de calor sem incrustações ( $A_{oc}$ ):

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

Passo 35. Área total da superfície de transferência de calor com incrustações ( $A_{of}$ ):

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

Passo 36. Número de garfos ( $N_h$ ):

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

### 2.3 Queda de pressão

Passo 37. Fator de atrito do fluido do lado da tubagem ( $f_t$ ):

Região ( $Re_t < 2,300$ ):

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

Fator de atrito do fluido do lado do tubo em escoamento laminar:

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

- Regime turbulento ( $4,000 < Re_t < 5,000,000$ ):

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

Passo 38. Queda de pressão do fluido do lado do tubo ( $\Delta p_t$ ):

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

Passo 39. Fator de atrito do fluido anular ( $f_a'$ ):

- Região laminar ( $Re_a < 2,300$ ):

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

Fator de atrito do fluido anular em escoamento laminar:

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

- Regime turbulento ( $4,000 < Re_a < 5,000,000$ ):

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

Passo 40. Queda de pressão do fluido anular ( $\Delta p_a$ ):

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

### 2.4. Potência de bombagem.

Passo 41: Potência de bombagem necessária para o fluido do lado da tubagem ( $P_t$ ):

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

Em que  $\eta_p$  é o rendimento da bomba = 0,80 - 0,85 [5].

Potência de bombagem necessária para o fluido anular ( $P_a$ ):

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

### 3. Resultados.

Os valores dos principais parâmetros de projeto calculados para o permutador de calor de tubos duplos com alhetas proposto, incluindo o número calculado de forquilhas, bem como a perda de carga e a potência de bombagem para ambas as correntes, são apresentados a seguir.

#### 3.1 Número de bifurcações.

Etapa 1: Definição dos parâmetros iniciais:

A Tabela 2 mostra os parâmetros iniciais necessários para projetar o permutador de calor de tubo duplo.

Tabela 2: Parâmetros iniciais disponíveis.

Parâmetros	Símbolo	Valor	Unidades
Caudal mássico de acetona	$m_h$	2.00	kg/s
Temperatura de entrada da acetona	$T_1$	90	°C
Temperatura de saída da acetona	$T_2$	30	°C
Temperatura de entrada da água	$t_1$	5	°C
Temperatura de saída da água	$t_2$	25	°C
Fator de escala da acetona	$R_h$	0.000352	$m^2 \cdot K/W$
Fator de escala da água	$R_c$	0.000176	$m^2 \cdot K/W$



Queda de pressão máxima para a acetona	$\Delta p_{hm}$	200,000	Pa
Queda de pressão máxima para a água	$\Delta p_{cm}$	900,000	Pa

Passo 2. Diâmetros do tubo interior e do anel

Os valores dos diâmetros interno e externo para um tubo interno com diâmetro nominal de  $\frac{3}{4}$  de polegada, Schedule 40, bem como o diâmetro interno do anel com diâmetro nominal de 2 polegadas, Schedule 40, conforme relatado por [19], são dados a seguir:

$$\text{Diâmetro interior do tubo (d\_i)} = 0,02093 \text{ m}$$

$$\text{Diâmetro exterior do tubo (d\_o)} = 0,02667 \text{ m}$$

$$\text{Diâmetro interior do anel (D\_i)} = 0,0525 \text{ m}$$

Passo 3: Temperatura média de ambos os fluidos:

Acetona:

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

Água:

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

Passo 4. Propriedades físicas de ambos os fluidos à temperatura média da etapa anterior

A Tabela 3 mostra os valores das propriedades físicas de ambos os fluidos, que foram determinados de acordo com os dados relatados em [19].

Tabela 3: Propriedades físicas de ambos os fluidos.

Propriedade física	Acetona	Água refrigerada	Unidades
Densidade	745.20	999.10	kg/m <sup>3</sup>
Viscosidade	0.000229	0.00114	Pa.s
Condutividade térmica	0.146	0.589	W/m.K
Capacidade térmica	2,300.25	4,188.47	J/kg.K

Fonte: Elaboração própria

Passo 5: Carga térmica ( $Q$ ):

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

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

Passo 6. Caudal mássico da água refrigerada ( $m_c$ ):

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

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

Passo 7. Localização dos fluidos no interior do permutador de calor:

De acordo com as sugestões de [2] e [20], o fluido frio (água) ficará localizado no interior do tubo interno,

enquanto que o fluido quente (acetona) escoará pelo anel. Assim, a Tabela 4 apresenta os símbolos antigos e novos que apresentarão os parâmetros iniciais para ambos os fluidos, tendo em conta a localização selecionada dos fluidos. Ou seja, os subscritos e serão substituídos por  $e$ , respectivamente, para todos os parâmetros iniciais e propriedades físicas de ambos os fluidos.

Tabela 4: Símbolos antigos e novos dos parâmetros iniciais de ambos os fluidos.

Parâmetro	Símbolo antigo	Novo símbolo	Unidades
Caudal mássico da acetona	$m_h$	$m_a$	kg/s
Caudal mássico da água	$m_c$	$m_t$	kg/s
Densidade da acetona	$\rho_h$	$\rho_a$	kg/m <sup>3</sup>
Densidade da água	$\rho_c$	$\rho_t$	kg/m <sup>3</sup>
Viscosidade da acetona	$\mu_h$	$\mu_a$	Pa.s
Viscosidade da água	$\mu_c$	$\mu_t$	Pa.s
Condutividade térmica da acetona	$k_h$	$k_a$	W/m.K
Condutividade térmica da água	$k_c$	$k_t$	W/m.K
Capacidade térmica da acetona	$Cp_h$	$Cp_a$	J/kg.K
Capacidade térmica da água	$Cp_c$	$Cp_t$	J/kg.K
Factores de escala da acetona	$R_h$	$R_a$	m <sup>2</sup> .K/W
Factores de escala da água	$R_c$	$R_t$	m <sup>2</sup> .K/W

Fonte: Elaboração própria

A Tabela 5 apresenta os resultados dos parâmetros determinados nos passos 8 a 17.

Tabela 5. Resultados dos parâmetros determinados nos passos 8 a 17.

Passo	Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidades	Equa. t.
8	Área da secção transversal líquida no anel com tubos interiores com alhetas longitudinais	$A_c$	0.00129	m <sup>2</sup>	(5)
9	Circunferência molhada total do anel com tubos interiores com alhetas longitudinais	$P_w$	0.949	m	(6)
10	Diâmetro hidráulico	$D_h$	0.0054	m	(7)
11	Perímetro do anel de transferência de calor para transferência de calor	$P_h$	0.784	m	(8)



12	Diâmetro equivalente para transferência de calor	$D_e$	0.0066	m	(9)	27	Eficiência das alhetas	$\eta_f$	0.190	-	(31)
13	Velocidade da água	$u_t$	9.60	m/s	(10)	28	Eficiência total da superfície	$\eta_o$	0.250	-	(32)
14	Número de Reynolds da água	$Re_t$	176,094	-	(11)	29	Área do tubo interior	$A_i$	0.552	$m^2$	(33)
15	Número de Prandtl da água	$Pr_t$	8.10	-	(12)	30	Coeficiente global de transferência de calor (com incrustações)	$U_f$	182.65	$W/m^2.K$	(34)
16	Fator de atrito	$f_t$	0.0040	-	(16)	31	Coeficiente global de transferência de calor (limpo)	$U_c$	508.39	$W/m^2.K$	(35)
17	Número de Nusselt da água	$Nu_t$	1,017.6	-	(17)	32	Fator de limpeza	$CF$	0.359	-	(36)
	Coeficiente de transferência de calor por convecção da água	$h_t$	28,637	$W/m^2.K$	(18)	33	Diferença de temperatura média logarítmica	$LMTD$	41.86	$^{\circ}C$	(37)
						34	Área total da superfície de transferência de calor sem incrustações	$A_{oc}$	12.97	$m^2$	(38)
						35	Área total da superfície de transferência de calor com incrustações	$A_{of}$	36.10	$m^2$	(39)
						36	Número de garfos	$N_h$	2.78 ≈ 3	-	(40)

Fuente: Elaboración propia

Como  $Re_t > 10.000$ , o fluido do lado do tubo flui em regime turbulento; portanto, as equações (16) e (17) serão usadas para determinar o número de Nusselt.

Fonte: Elaboração própria.

A Tabela 6 mostra os resultados dos parâmetros calculados nos passos 18 a 22.

Tabela 6 - Resultados dos parâmetros determinados nos passos 18 a 22.

Passo	Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidades	Equat.
18	Velocidade da acetona	$u_a$	2.08	m/s	(19)
19	Número de Reynolds da acetona <sup>1</sup>	$Re_a$	36,550,6	-	(20)
20	Número de Prandtl da acetona	$Pr_a$	3.61	-	(21)
	Fator de atrito da acetona	$f_a$	0.0056	-	(24)
21	Número de Nusselt da acetona	$Nu_a$	186.69	-	(25)
22	Coeficiente de transferência de calor por convecção da acetona	$h_a$	4,127.6	$W/m^2.K$	(26)

Como  $Re_a > 10.000$ , o fluido do anel flui em regime turbulento; portanto, as equações (24) e (25) serão usadas para determinar o número de Nusselt.

Fonte: Elaboração própria.

A Tabela 7 apresenta os resultados dos parâmetros calculados nos passos 23 a 36.

Tabela 7 - Resultados dos parâmetros determinados nos passos 23 a 36.

Passo	Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidades	Equat.
23	Área de transferência de calor com alhetas	$A_f$	6.092	$m^2$	(27)
24	Área de transferência de calor sem alhetas	$A_u$	0.492	$m^2$	(28)
25	Área total da bobina	$A_t$	6.584	$m^2$	(29)
26	Fator	$m$	420	-	(30)

### 3.2. Queda de pressão

Dado que o fluido do lado do tubo (água) escoa em regime turbulento ( $Re_t = 176.094 > 10.000$ ), foram utilizadas as equações (43) e (44) para determinar a queda de pressão deste fluido. Assim:

Passo 37. Fator de fricção da água ( $f_t^a$ ) para regime turbulento:

$$f_t^a = 0,00140 + 0,125 \cdot Re_t^{(-0,32)} = 0,0040 \quad (43)$$

Passo 38. Queda de pressão da água ( $\Delta p_t$ ):

$$\Delta p_t = 4 \cdot f_t^a \cdot (2 \cdot L_t) / d_i \cdot \rho_t \cdot (u_t^2) / 2 \cdot N_h = 886.903 \text{ Pa} \quad (44)$$

Como o fluido do anel (acetona) também escoa em regime turbulento ( $Re_a = 36.550,6 > 10.000$ ), foram utilizadas as equações (47) e (48) para determinar a queda de pressão deste fluido. Assim:

Passo 39. Fator de fricção da acetona ( $f_a^a$ ) para regime turbulento:

$$f_a^a = 0,00140 + 0,125 \cdot Re_a^{(-0,32)} = 0,0057 \quad (47)$$

Passo 40. Queda de pressão da acetona ( $\Delta p_a$ ):

$$\Delta p_a = 4 \cdot f_a^a \cdot (2 \cdot L_t) / D_h \cdot \rho_a \cdot (u_a^2) / 2 \cdot N_h = 171.518 \text{ Pa} \quad (48)$$

### 3.3. Potência de bombagem

Passo 41. Potência de bombagem necessária para a água ( $P_t$ ):

$$P_t = (m_t \cdot \Delta p_t) / (\rho_t \cdot \eta_p) = 3.662 \text{ W} \quad (49)$$



Passo 42. Potência de bombagem necessária para a acetona (P<sub>a</sub>):

$$P_a = (m_a \cdot \Delta p_a) / (\rho_a \cdot \eta_p) = 575 \text{ W} \quad (50)$$

#### 4. Discussão

A carga térmica necessária para arrefecer o fluxo de acetona foi de 276.030 W, enquanto o caudal mássico de água fria necessário para o processo de troca térmica é de 3,30 kg/s. A velocidade da água fria (9,60 m/s) é 4,61 vezes superior à velocidade da acetona (2,08 m/s). Isto deve-se ao maior valor do caudal mássico da água fria (3,30 kg/s) em comparação com o da acetona (2,0 kg/s), bem como ao maior valor da área líquida da seção transversal no anel com tubos com aletas longitudinais (0,00129 m<sup>2</sup>), usada na equação (19), em comparação com o valor do termo ( $\pi \cdot d_i \cdot 4$ ) (0,00034 m<sup>2</sup>), usado na equação (10).

O número de Reynolds da água fria (176.094) é aproximadamente 4,82 vezes superior ao número de Reynolds da acetona (36.550,6), o que se deve ao maior valor da velocidade (9,60 m/s) e da densidade (999,10 kg/m<sup>3</sup>) da água fria, em comparação com os valores destes parâmetros para a acetona (velocidade de 2,08 m/s e densidade de 745,20 kg/m<sup>3</sup>). Além disso, o maior valor obtido para o diâmetro interior do tubo (0,02093 m), em comparação com o valor do diâmetro hidráulico (0,0054 m), também influenciou este resultado.

m), influenciou este resultado. Como mencionado anteriormente, os fluidos escoarão em regime turbulento dentro do DPHE projetado, dado que os valores calculados do número de Reynolds para ambos os fluidos são superiores a 10.000.

Relativamente ao número de Nusselt, o valor deste parâmetro para a água fria (1.017,61) é 5,45 vezes superior ao número de Nusselt da acetona (186,69), devido aos valores mais elevados obtidos para o número de Reynolds (176.094) e o número de Prandtl (8,10) da água fria, em comparação com os valores destes parâmetros para a acetona (número de Reynolds de 36.550,6 e número de Prandtl de 3,61).

No que diz respeito ao coeficiente convectivo de transferência de calor, o valor deste parâmetro para a água fria (28.637 W/m<sup>2</sup>·K) é 6,94 vezes superior ao valor obtido para a acetona. Isto deve-se principalmente ao valor mais elevado do número de Nusselt (1.017,61) e da condutividade térmica (0,589 W/m·K) obtidos para a água fria, em comparação com os valores destes parâmetros para a acetona (número de Nusselt de 186,69 e condutividade térmica de 0,146 W/m·K).

O valor calculado da eficiência da aleta foi de 0,190, o que pode ser considerado baixo. Isto deve-se principalmente ao elevado valor obtido para o coeficiente convectivo de transferência de calor da acetona (4.127,6 W/m<sup>2</sup>·K), que por sua vez aumenta o valor do fator (equação 30), diminuindo

assim a eficiência da aleta (equação 31). A eficiência global da superfície teve um valor de 0,250, o que também pode ser considerado baixo. O baixo valor obtido para a eficiência da aleta influenciou negativamente o valor da eficiência global da superfície.

O coeficiente global de transferência de calor em condições limpas (U<sub>c</sub>) foi de 508,39 W/m<sup>2</sup>·K, sendo 2,78 vezes superior ao coeficiente global de transferência de calor em condições com incrustação (182,65 W/m<sup>2</sup>·K). O valor calculado de U<sub>c</sub> está de acordo com os intervalos reportados por [5] e [18] para este tipo de serviço de transferência de calor.

O fator de limpeza teve um valor de 0,359, o que pode ser considerado baixo. Isto deve-se ao baixo valor obtido para o coeficiente global de transferência de calor em condições com incrustação (182,65 W/m<sup>2</sup>·K) e ao elevado valor do coeficiente global de transferência de calor em superfície limpa (508,39 W/m<sup>2</sup>·K). O valor do fator de limpeza calculado neste estudo é inferior ao valor sugerido por [5] para projetos típicos (0,85). Segundo [5], o fator de limpeza é um termo desenvolvido para a indústria de geração de vapor que fornece uma tolerância para a incrustação e que relaciona o coeficiente global de transferência de calor quando o permutador está sujo com o valor correspondente em condições limpas. Esta abordagem oferece uma tolerância à incrustação que varia diretamente com o coeficiente global de transferência de calor em superfície limpa (U<sub>c</sub>), e, embora o fator de limpeza resulte em tendências favoráveis, o projetista deve ainda assim selecionar o fator CF adequado à sua aplicação [5].

A área total de superfície de transferência de calor com e sem incrustação foi de 36,10 m<sup>2</sup> e 12,97 m<sup>2</sup>, respectivamente; portanto, serão necessários cerca de 3 serpentinas para o permutador de calor de tubo com aletas projetado (Figura 3). Os valores calculados da perda de carga para a água fria e a acetona foram de 886.903 Pa e 171.518 Pa, respectivamente, estando ambos abaixo dos valores máximos permitidos estabelecidos pelo processo para os dois fluidos (900.000 Pa para a água fria e 200.000 Pa para a acetona). É de salientar que a perda de carga da água fria é 5,17 vezes superior à da acetona, o que se deve essencialmente ao maior valor obtido para a velocidade (9,60 m/s) e para a densidade (999,10 kg/m<sup>3</sup>) da água fria, comparativamente com os valores obtidos para a acetona (velocidade de 2,08 m/s e densidade de 745,20 kg/m<sup>3</sup>).

Finalmente, a potência de bombagem requerida para a água fria (3.662 W) é 6,37 vezes superior à potência necessária para a acetona (575 W), o que se deve em grande parte ao maior valor de perda de carga obtido para o escoamento da água fria, em comparação com o valor de perda de carga da acetona.



Fig. 3. Esquema do permutador de calor de tubo com aletas projetado com três serpentinas e fluidos a escoar em contracorrente.

Fonte: Elaboração própria.

Em [5], foi projetado um permutador de calor de tubo com aletas para arrefecer 3 kg/s de um fluxo de óleo de motor de 65 °C para 55 °C, utilizando água do mar disponível a 20 °C, onde a água do mar (fluído frio) se encontrava no tubo interior e o óleo de motor no anel. Entre os resultados obtidos, o regime de escoamento no tubo interior é turbulento e no anel é laminar; a eficiência das aletas e a eficiência global da superfície têm valores de 0,682 e 0,703, respectivamente; os coeficientes globais de transferência de calor em condições com e sem incrustação são de 108,6 W/m<sup>2</sup>·K e 127,6 W/m<sup>2</sup>·K, respectivamente; o fator de limpeza é de 0,85 e serão necessárias duas serpentinas para este serviço de transferência de calor. Finalmente, a perda de carga e a potência de bombagem para a água do mar são de 135 kPa e 237,3 W, respectivamente, enquanto a perda de carga e a potência para o óleo de motor (em regime laminar) são de 7,5 MPa e 31,8 kW, respectivamente.

Em [2], foi projetado outro permutador de tubo com aletas utilizando a metodologia de dimensionamento de Kern, onde se pretende arrefecer 8.165 kg/h de gasóleo 28 °API de 121 °C para 93 °C, utilizando água a 27 °C como meio de arrefecimento. Neste projeto de dimensionamento, o fluido quente (gasóleo) foi colocado no anel, enquanto o fluido frio (água) ficou no tubo interior. Os valores para a eficiência da aleta e a eficiência global da superfície são de 0,307 e 1,54, respectivamente; enquanto os coeficientes globais de transferência em condições limpas e com incrustação (de projeto) apresentam valores de 1.618,3 W/m<sup>2</sup>·K e 670 W/m<sup>2</sup>·K, respectivamente. É necessário utilizar quatro serpentinas e as perdas de carga calculadas no anel e no tubo interior são de 62.604,39 Pa e 10.824,77 Pa, respectivamente.

## 5. Conclusões.

Foi projetado um permutador de calor de tubo duplo com aletas do ponto de vista térmico e hidráulico, utilizando a metodologia e correlações reportadas em [5] e [18], onde foram determinados vários parâmetros de dimensionamento, como o fator de limpeza e o número de serpentinas, bem como a perda de carga e a potência de bombagem de ambos os fluxos, entre outros. A carga térmica teve um valor de 276.030 W, enquanto será necessário um caudal mássico de água fria de 3,30 kg/s para arrefecer o fluxo de acetona. Considerando os valores calculados do número de Reynolds para a água fria (176.094) e a acetona (36.550,6), ambos os fluxos escoarão em regime turbulento dentro do permutador de tubo duplo com aletas projetado, enquanto os coeficientes convectivos de transferência de calor para a água fria e a acetona foram de 28.637 e 4.127,6 W/m<sup>2</sup>·K, respectivamente. O coeficiente global de transferência de calor em condições com e sem incrustação teve valores de 182,65 e 508,39 W/m<sup>2</sup>·K,

respectivamente, enquanto o fator de limpeza foi de 0,359. A área total de superfície de transferência de calor com e sem incrustação teve valores de 36,10 m<sup>2</sup> e 12,97 m<sup>2</sup>, respectivamente. O permutador de tubo com aletas projetado necessitará de três serpentinas, e a perda de carga tanto da água fria (886.903 Pa) como da acetona (171.518 Pa) encontra-se abaixo dos valores máximos estabelecidos pelo processo de troca térmica. O fluxo de água fria requererá uma potência de bombagem de 3.662 W, enquanto a potência de bombagem requerida para o fluxo de acetona será de 575 W.

## 6.- Contribuições dos Autores.

1. Conceptualização: Amaury Pérez Sánchez.
2. Curadoria de dados: Laura Thalía Alvarez Lores.
3. Análise formal: Amaury Pérez Sánchez, Elizabeth Eianne Artigas Cañizares.
4. Obtenção de financiamento: Não aplicável.
5. Investigação: Amaury Pérez Sánchez, Elizabeth Eianne Artigas Cañizares, Laura Thalía Alvarez Lores.
6. Metodologia: Amaury Pérez Sánchez.
7. Gestão do projeto: Não aplicável.
8. Recursos: Não aplicável.
9. Software: Não aplicável.
10. Supervisão: Amaury Pérez Sánchez.
11. Validação: Amaury Pérez Sánchez.
12. Visualização: Não aplicável.
13. Redação – rascunho original: Elizabeth Eianne Artigas Cañizares, Laura Thalía Alvarez Lores.
14. Redação – revisão e edição: 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/app1113594>
- [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://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	$\text{m}^2$
$A_f$	Finned heat transfer area	$\text{m}^2$
$A_i$	Area of the inner tube	$\text{m}^2$
$A_{oc}$	Total heat transfer surface area without fouling	$\text{m}^2$
$A_{of}$	Total heat transfer surface area with fouling	$\text{m}^2$
$A_t$	Total area of hairpin	$\text{m}^2$
$A_u$	Unfinned heat transfer area	$\text{m}^2$
$Cp$	Heat capacity	$\text{J}/\text{kg.K}$
CF	Cleanliness factor	-
$d_i$	Inner diameter of tube	$\text{m}$
$d_o$	Outer diameter of tube	$\text{m}$
$D_e$	Equivalent diameter for heat transfer	$\text{m}$
$D_h$	Hydraulic diameter	$\text{m}$
$D_i$	Inner diameter of annulus	$\text{m}$
$f$	Friction factor for heat transfer	-
$f'$	Friction factor for pressure drop	-
$h$	Convective heat transfer coefficient	$\text{W}/\text{m}^2.\text{K}$
$H_f$	Fin height	$\text{m}$
$k$	Thermal conductivity	$\text{W}/\text{m.K}$
$k_m$	Thermal conductivity of the inner tube material	$\text{W}/\text{m.K}$
$L_t$	Length of hairpin	$\text{m}$
LMTD	Log-mean temperature difference	$^{\circ}\text{C}$
$m$	Mas flowrate	$\text{kg}/\text{s}$

$m$	Factor	-
$N_f$	Number of fins per tube	-
$N_h$	Number of hairpins	-
$N_t$	Number of tubes inside the annulus	-
$Nu$	Nusselt number	-
$\Delta p$	Pressure drop	$\text{Pa}$
$\Delta p_m$	Maximum allowable pressure drop	$\text{Pa}$
$P$	Pumping power	$\text{W}$
$P_h$	Heat transfer perimeter of the annulus for heat transfer	$\text{m}$
$Pr$	Prandtl number	-
$P_w$	Total wetted perimeter of the annulus with longitudinally finned inner tubes	$\text{m}$
$Q$	Heat load	$\text{W}$
$R$	Fouling factor	$\text{m}^2.\text{K}/\text{W}$
$Re$	Reynolds number	-
$t$	Temperature of the cold fluid	$^{\circ}\text{C}$
$T$	Temperature of the hot fluid	$^{\circ}\text{C}$
$T_w$	Tube wall temperature	$^{\circ}\text{C}$
$\bar{t}$	Average temperature of the cold fluid	$^{\circ}\text{C}$
$\bar{T}$	Average temperature of the hot fluid	$^{\circ}\text{C}$
$u$	Velocity	$\text{m}/\text{s}$
$U_c$	Overall heat transfer coefficient under clean conditions	$\text{W}/\text{m}^2.\text{K}$
$U_f$	Overall heat transfer coefficient under fouling conditions	$\text{W}/\text{m}^2.\text{K}$

## Greek symbols

$\rho$	Density	$\text{kg}/\text{m}^3$
$\mu$	Viscosity	$\text{Pa.s}$
$\delta$	Fin thickness	$\text{m}$
$\eta_f$	Fin efficiency	-
$\eta_o$	Overall surface efficiency	-

## Subscripts

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



# Proposta ergonômica abrangente para a redução dos riscos musculoesqueléticos na produção de sabão: uma abordagem baseada em análise estatística e avaliação postural

*Proposta ergonômica abrangente para a redução dos riscos musculoesqueléticos na produção de sabão: uma abordagem baseada em análise estatística e avaliação postural.*

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

Recebido: 05/10/2024 – Aceito: 29/05/2025 – Publicado: 01/07/2025

Artigos de  
Investigação  Artigos  
Avaliação

Artigos  
de Ensaios

\* Autor correspondente.



\* Autor correspondente.

## Resumo

Na indústria de produção de sabão, os trabalhadores enfrentam riscos ergonômicos significativos devido a tarefas repetitivas, manuseio de cargas e posturas inadequadas, que podem causar lesões musculoesqueléticas, fadiga e estresse, afetando a saúde e a produtividade. A pesquisa teve como objetivo elaborar uma proposta ergonômica abrangente para melhorar as condições físicas e reduzir os riscos ergonômicos na linha de produção de sabão, identificando riscos e desenvolvendo soluções práticas baseadas em uma análise minuciosa. O diagnóstico inicial foi feito por meio de levantamentos ergonômicos e observações no local. As respostas foram analisadas utilizando métodos padronizados de avaliação postural e testes estatísticos (qui-quadrado, V de Cramer, Lambda). Foram identificados os principais riscos ergonômicos e formuladas recomendações e soluções práticas. Como resultado, obteve-se que: 67% dos trabalhadores relataram manter posturas forçadas do pescoço por mais de 2 horas contínuas, e 58% do tronco. 42% realizam movimentos repetitivos dos braços e punhos por mais de 4 horas contínuas e 33% manuseiam manualmente cargas superiores a 25 kg. Além disso, 17% estão expostos a vibrações e 25% a temperaturas extremas. A falta de treinamento em ergonomia foi relatada por 100% dos trabalhadores. As análises estatísticas revelaram associações significativas entre as variáveis ergonômicas, fornecendo uma base sólida para a formulação de propostas de melhoria. A pesquisa confirmou a alta prevalência de riscos ergonômicos na produção de sabão, ressaltando a necessidade de intervenções ergonômicas proativas para melhorar a saúde e a produtividade dos trabalhadores.

**Descriptores:** Ergonomia; riscos ergonómicos; Perturbações músculo-esqueléticas (LME); Posturas forçadas; Movimentos repetitivos; Manuseamento de cargas.

## 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.

## 1.- Introdução.

Na indústria de produção de sabão, os trabalhadores enfrentam riscos ergonômicos significativos devido a tarefas repetitivas, manuseio de carga e posturas inadequadas. Essas condições podem causar lesões musculoesqueléticas, fadiga e estresse, afetando a saúde dos funcionários e a produtividade da empresa.

Apesar da importância da ergonomia, muitas empresas não implementam propostas ergonômicas abrangentes, expondo os trabalhadores a condições desfavoráveis que aumentam o risco de lesões e absenteísmo ao trabalho.

É crucial que as empresas tomem medidas proativas para avaliar e melhorar as condições ergonómicas. Uma proposta ergonômica específica para a produção de sabonetes pode identificar riscos e desenvolver soluções práticas,

<sup>1</sup> Investigador Independente; [genescastro89@hotmail.com](mailto:genescastro89@hotmail.com) ; Guayaquil; Equador.

<sup>2</sup> Investigador Independente; [davi-torres14@outlook.com](mailto:davi-torres14@outlook.com) ; Guayaquil; Equador.

<sup>3</sup> Universidade de Guayaquil; [luis.zalameac@ug.edu.ec](mailto:luis.zalameac@ug.edu.ec) ; <https://orcid.org/0009-0000-1511-0219> ; Guayaquil; Equador.

<sup>4</sup> Universidade de Guayaquil; [francisco.duquea@ug.edu.ec](mailto:francisco.duquea@ug.edu.ec) ; <https://orcid.org/0000-0001-9533-1635> ; Guayaquil, Equador.

<sup>5</sup> Universidade de Havana; [feman@matcom.uh](mailto:feman@matcom.uh); <https://orcid.org/0009-0002-8275-7631> ; Havana; Cuba.

melhorando a saúde dos colaboradores e a eficiência operacional.

Dentro da empresa, os trabalhadores na linha de produção enfrentam vários riscos ergonómicos decorrentes das tarefas e processos envolvidos.

Através de observações no local e da utilização de uma folha de registo primária, foram identificadas algumas situações preocupantes: movimentos repetitivos, movimentação de cargas, posturas forçadas, fatores ambientais.

Com base no exposto, o objetivo desta pesquisa é elaborar uma proposta ergonómica abrangente que permita a melhoria das condições físicas e a redução dos riscos ergonómicos na linha de produção de sabão.

Para cumprir o objetivo proposto, propõe-se primeiro realizar um diagnóstico inicial por meio de um levantamento ergonómico de todos os trabalhadores na linha de produção, em seguida, será realizada uma análise de cada uma das respostas e uma análise de correlação será realizada por meio do teste qui-quadrado; e, por último, será proposto um conjunto de soluções propostas.[1]

### 1.1.- Perturbações músculo-esqueléticas na indústria transformadora

Fundamentação das principais lesões musculoesqueléticas em ambientes industriais.- As perturbações músculo-esqueléticas (LME) em ambientes industriais constituem um grupo complexo de patologias que afetam principalmente os músculos, tendões, nervos e articulações, manifestando-se predominantemente nos membros superiores e na coluna vertebral. Estes distúrbios caracterizam-se pela sua natureza cumulativa, resultante da exposição prolongada a fatores de risco biomecânicos e organizacionais no ambiente de trabalho. A evidência epidemiológica indica que aproximadamente 65% dos trabalhadores industriais sofrem de algum tipo de DME durante a sua vida profissional, sendo a tendinite, a síndrome do túnel cárpico e a lombalgia as manifestações mais frequentes.[2]

Relação entre posturas forçadas prolongadas e o desenvolvimento de patologias ocupacionais.- As posturas forçadas prolongadas representam um fator crítico no desenvolvimento de patologias ocupacionais, caracterizadas por gerar sobrecarga biomecânica nas estruturas musculoesqueléticas. Estudos longitudinais demonstraram que a exposição sustentada a ângulos articulares extremos por períodos superiores a 2 horas contínuas aumenta o risco de desenvolver lesões crônicas em 60%. Este fenômeno é explicado pela alteração dos padrões de recrutamento muscular e pela redução do fluxo sanguíneo nos tecidos afetados, desencadeando processos

inflamatórios crônicos e degeneração estrutural progressiva.[3]

Impacto económico e social das perturbações músculo-esqueléticas na indústria de sabonetes.- As perturbações músculo-esqueléticas na indústria de sabonetes geram repercussões económicas significativas, que se manifestam em custos diretos e indiretos. As análises financeiras do sector indicam que cerca de 30% do absentismo laboral é atribuído a lesões musculoesqueléticas, representando perdas anuais estimadas entre 4-6% da produção total. Além disso, os custos associados à compensação, tratamento médico e programas de reabilitação constituem aproximadamente 15% das despesas operacionais anuais. A dimensão social reflete-se na diminuição da qualidade de vida dos trabalhadores, afetando a sua capacidade produtiva e o ambiente familiar.[4][5]

### 1.2.- Fatores de Risco Ergonómicos nas Linhas de Produção

Classificação das posturas forçadas.- As posturas forçadas no campo industrial são categorizadas de acordo com o seu impacto biomecânico e área anatômica afetada. A flexão cervical superior a 20° sustentada por mais de 2 horas apresenta alto risco, enquanto desvios do tronco superiores a 30° geram compressão discal significativa. Nos membros superiores, abdução glenoumeral superior a 60° e desvios radioulnares superiores a 15° constituem os parâmetros críticos. Esta classificação permite o estabelecimento de limites de exposição e o desenvolvimento de estratégias preventivas específicas de acordo com a procura biomecânica de cada segmento corporal.[6]

Movimentos repetitivos e sua quantificação.- A quantificação dos movimentos repetitivos baseia-se em parâmetros biomecânicos específicos, onde a frequência, duração e força exercida constituem as variáveis críticas de análise. Um movimento é considerado repetitivo quando o seu ciclo fundamental é inferior a 30 segundos ou quando mais de 50% do ciclo envolve o mesmo padrão de movimento. A avaliação quantitativa incorpora a análise de frequência utilizando técnicas de amostragem temporal, estabelecendo índices de exposição baseados no número de repetições por unidade de tempo e nos períodos de recuperação associados.[7][8]

Movimentação Manual de Cargas e Limites Admissíveis.- A movimentação manual de cargas é regida por princípios biomecânicos que estabelecem limites admissíveis com base na equação NIOSH revista. Os fatores determinantes incluem distância horizontal (H), altura vertical (V), deslocamento vertical (D), assimetria (A), frequência de elevação (F) e acoplamento (C). O limite de peso recomendado (LPR) é calculado considerando uma constante de carga de 23 kg multiplicada por estes fatores multiplicadores. Esta metodologia permite determinar o

índice de elevação (IL), que, quando ultrapassa 1,0, indica um risco significativo de lesão.[9]

Fatores ambientais.- Os fatores ambientais em ambientes industriais são variáveis críticas que modulam o risco ergonômico. Temperaturas extremas ( $>28^{\circ}\text{C}$  ou  $<15^{\circ}\text{C}$ ) alteram a capacidade muscular e a precisão motora em 20-30%. As vibrações, especialmente na faixa de 5-1400 Hz, afetam a microcirculação tecidual e a condução nervosa. A iluminação inadequada ( $<500$  lux em tarefas de precisão) aumenta a tensão muscular cervical em aproximadamente 15% devido à adoção de posturas compensatórias.[10]

### 1.3.- Metodologias de Avaliação Ergonómica em Processos Industriais

Métodos de avaliação postural.- Os métodos de avaliação postural compreendem sistemas de análise biomecânica padronizados que quantificam o risco associado a diferentes configurações corporais. Métodos como RULA, REBA e OWAS estabelecem escores baseados no desvio angular de segmentos corporais de posições neutras, considerando fatores como carga/força, acoplamento e atividade muscular. Estes métodos permitem categorizar o nível de risco em escalas validadas e estabelecer prioridades ergonómicas de intervenção.[11]

Instrumentos de avaliação de riscos ergonómicos.- Os instrumentos de avaliação ergonómica são instrumentos sistemáticos que integram múltiplas variáveis de exposição ocupacional. Métodos como JSI (Job Strain Index) e OCRA (Occupational Repetitive Actions) fornecem índices compostos que consideram a intensidade, duração, frequência, postura e fatores adicionais do esforço. Estas ferramentas permitem obter pontuações normalizadas que facilitam a comparação entre diferentes trabalhos e a identificação de prioridades preventivas.[12]

Técnicas ergonómicas de amostragem e coleta de dados.- As técnicas ergonómicas de amostragem empregam protocolos estruturados que combinam observação direta, gravação videográfica e medições instrumentais. A amostragem temporal usando técnicas de descanso no trabalho permite a caracterização de padrões de exposição, enquanto os sistemas de análise de movimento fornecem dados cinemáticos precisos. A frequência de amostragem é estabelecida considerando a variabilidade da tarefa, normalmente exigindo observações de 30-60 minutos por ciclo de trabalho para obter dados representativos.[13] [14]

Validação de instrumentos de avaliação.- A validação de instrumentos de avaliação ergonómica requer um processo sistemático que inclui análise de fiabilidade inter e intra-avaliadores, validade de construto e sensibilidade à mudança. Os coeficientes de correlação intraclasse (ICCs) devem exceder 0,80 para serem considerados aceitáveis, enquanto a validade concorrente é estabelecida por comparação com métodos padrão-ouro. A sensibilidade é

avaliada pela capacidade do instrumento de detetar alterações clinicamente significativas nas condições ergonómicas avaliadas.[15]

### 1.4.- Concepção ergonómica dos postos de trabalho

Princípios da antropometria aplicada.- A antropometria aplicada é um pilar fundamental na conceção ergonómica dos locais de trabalho, baseada na medição sistemática das dimensões corporais da população ativa. Esta disciplina estabelece que o desenho deve acolher 90% da população utilizadora, considerando o intervalo entre o percentil 5 e o percentil 95. Os dados antropométricos críticos incluem alturas funcionais, alcances, dimensões de aderência e folgas, sendo especialmente relevantes na indústria de sabonetes, onde as tarefas exigem precisão manual. A aplicação destes princípios permite estabelecer dimensões ótimas para superfícies de trabalho, considerando uma altura de 5-10 cm abaixo do cotovelo para tarefas de precisão e 15-40 cm abaixo do cotovelo para tarefas que exijam maior força.[16]

Configuração ideal de elementos e ferramentas.- A disposição estratégica de elementos e ferramentas no espaço de trabalho deve seguir princípios de economia de movimento e zoneamento funcional. As ferramentas usadas com frequência devem estar localizadas na área de alcance ideal (raio de 35-45 cm do ponto de referência do operador), enquanto os itens de uso ocasional devem estar localizados na área de alcance máximo (raio de 55-65 cm). A configuração deve considerar a sequência operacional do processo, minimizando movimentos desnecessários e cruzados. Estudos técnicos mostram que uma configuração otimizada pode reduzir movimentos improdutivos em até 30% e reduzir o tempo de ciclo em operações manuais em 25%. [17]

Critérios de projeto para minimizar posturas forçadas.- Os critérios de projeto para a prevenção de posturas forçadas são baseados em princípios biomecânicos que procuram manter as articulações em posições neutras pelo maior tempo possível. As superfícies de trabalho devem ser ajustáveis em altura ( $\pm 15$  cm do ponto ideal) para acomodar a variabilidade antropométrica. Os planos de trabalho devem ser inclinados 15-20° para tarefas de precisão visual, reduzindo a flexão cervical. A conceção deve incluir espaços livres para os pés (mínimo de 15 cm de profundidade e 15 cm de altura) que permitam ao trabalhador aproximar-se adequadamente. A implementação destes critérios demonstrou reduzir a incidência de posturas incômodas nas linhas de produção em 40-60%. [18]

Considerações ambientais na conceção de postos de trabalho.- O projeto ambiental de trabalhos deve integrar parâmetros técnicos específicos que garantam condições ótimas para a execução das tarefas. A iluminação deve fornecer níveis entre 500-1000 lux para tarefas de precisão,

com uma uniformidade mínima de 0,7 e um índice de renderização de cores superior a 80. A temperatura de funcionamento deve ser mantida entre 20-24°C, com uma humidade relativa de 30-60%. Os níveis de ruído não devem exceder 85 dBA em turnos de 8 horas e as vibrações devem ser controladas de modo a não excederem os limites de exposição diária A(8) de 2,5 m/s<sup>2</sup>. Estas especificações técnicas são fundamentais para prevenir a fadiga sensorial e manter níveis ótimos de desempenho no trabalho.[19]

### 1.5.- Intervenções ergonómicas na indústria

Estratégias de controle de engenharia.- As estratégias de controle de engenharia constituem a primeira linha de defesa na hierarquia de controles ergonômicos, com base em modificações físicas do ambiente de trabalho para eliminar ou reduzir os fatores de risco em sua origem. Estas intervenções incluem a implementação de sistemas de assistência mecânica para movimentação de cargas (com capacidades de 25-50 kg), plataformas elevatórias ajustáveis (faixa de ajuste vertical de ±30 cm) e sistemas automatizados para tarefas repetitivas (frequência >30 ciclos/minuto). Os dados técnicos mostram que a implementação de controlos de engenharia pode reduzir a carga biomecânica em tarefas críticas até 75% e reduzir a prevalência de lesões musculoesqueléticas relacionadas com o trabalho em 60%. A eficácia destas intervenções é quantificada através de análises biomecânicas pré e pós-implementação, utilizando métodos padronizados como RULA ou NIOSH.[20][21]

Medidas administrativas e organizacionais.- As medidas administrativas e organizacionais compreendem um conjunto de estratégias que modificam os padrões de trabalho e a exposição a fatores de risco ergonômicos. A implementação de uma rotação sistemática de tarefas (a cada 2-4 horas) entre tarefas que envolvem diferentes grupos musculares reduz a carga cumulativa em estruturas específicas. O estabelecimento de ciclos otimizados de trabalho-descanso (10 minutos de pausa para cada 50 minutos de trabalho em tarefas de elevada exigência física) permite uma adequada recuperação fisiológica. Estudos técnicos indicam que estas medidas, quando implementadas seguindo protocolos estruturados, podem reduzir as taxas de fadiga muscular em 40% e diminuir as taxas de absentismo relacionado com lesões musculoesqueléticas em 35%. [22]

Programas de formação e sensibilização.- Os programas de formação e sensibilização ergonómica devem ser estruturados através de uma abordagem sistemática baseada em evidências, incorporando elementos teóricos e práticos quantificáveis. A metodologia deve incluir avaliações pré e pós-formação, com um mínimo de 20 horas de formação inicial e sessões de reforço trimestrais de 4 horas. O conteúdo técnico deve abranger biomecânica ocupacional, reconhecimento de fatores de risco (usando listas de verificação padronizadas), técnicas de movimentação manual de cargas e exercícios de compensação muscular. A

eficácia do programa é medida por indicadores específicos como uma redução de 50% nas posturas de risco e um aumento de 80% no conhecimento de práticas seguras, validados através de avaliações estruturadas.[23]

Avaliação da eficácia das intervenções.- A avaliação da eficácia das intervenções ergonómicas requer uma abordagem multimétrica que integre indicadores quantitativos e qualitativos. O protocolo de avaliação deve incluir medições biomecânicas pré e pós-intervenção (utilizando eletromiografia de superfície e análise cinemática), índices de produtividade (eficiência operacional e taxas de erro), indicadores de saúde ocupacional (frequência e gravidade das lesões musculoesqueléticas) e análise custo-benefício. A metodologia de avaliação deve seguir um desenho longitudinal com períodos mínimos de seguimento de 6-12 meses, utilizando grupos de controlo quando possível. Os resultados devem ser analisados utilizando métodos estatísticos robustos (ANOVA de medidas repetidas, análise de regressão múltipla) para estabelecer a significância das mudanças observadas e a magnitude do efeito das intervenções implementadas.[24]

## 2.- Materiais e métodos.

### Materiais

A pesquisa foi realizada em uma empresa dedicada à produção de sabonetes higiênicos localizada na cidade de Durán, província de Guayas, Equador. Foram utilizados os seguintes materiais:

- **Questionários padronizados:** Avaliar a percepção dos trabalhadores sobre as condições de trabalho e a presença de desconforto musculoesquelético.
- **Folhas de registo primárias:** Para documentar observações no local de movimentos repetitivos, movimentação de cargas, posturas forçadas e fatores ambientais.
- **Instrumentos de medição ergonômica:** Incluindo ferramentas como RULA, REBA e OWAS para avaliação postural.
- **Software estatístico:** Para análise de dados e testes estatísticos, como o teste do qui-quadrado.

### Método

#### 1. Diagnóstico inicial:

- É realizado um levantamento ergonômico de todos os trabalhadores da linha de produção.
- Observação e registo diretos das condições de trabalho através de folhas de registo primárias.

#### 2. Análise de dados:

- Análise das respostas ao inquérito para identificar a prevalência de riscos ergonómicos.
  - Avaliação postural utilizando métodos padronizados.

#### 3. Análise estatística:

- Aplicação do teste qui-quadrado para determinar a significância das associações entre variáveis.

- Cálculo de medidas simétricas (V de Cramer) e direcionais (Lambda) para avaliar a intensidade e previsibilidade das associações.

#### 4. Desenvolvimento da proposta ergonómica:

- Identificação dos principais riscos ergonómicos.
- Formulação de recomendações e soluções práticas baseadas na análise de dados.

#### População e Amostra

A população do estudo foi constituída por trabalhadores da linha de produção de sabão de uma empresa localizada em Durán, Equador. A amostra foi selecionada de forma não probabilística, incluindo todos os trabalhadores disponíveis durante o período do estudo (janeiro a junho de 2024). No total, participaram 12 trabalhadores, que preencheram os questionários e foram observados durante suas atividades laborais.[25]

#### Análise estatística

Para a análise dos dados foram utilizados os seguintes métodos estatísticos:

- **Teste qui-quadrado ( $\chi^2$ ):** Avaliar a significância de associações entre variáveis dicotômicas. Foram consideradas associações altamente significativas aquelas com  $p \leq 0,001$ , muito significativas com  $0,001 < p \leq 0,003$  e significativas com  $0,003 < p < 0,05$ .
- **Medidas simétricas (V de Cramer):** Determinar a intensidade das associações entre variáveis. Valores de V próximos a 1 indicam associações muito fortes.
- **Medidas direcionais (Lambda):** Avaliar a capacidade preditiva de associações, com valores próximos a 1 indicando alta previsibilidade.

Os resultados da análise estatística revelaram padrões de associação

robusto e não aleatório entre as variáveis, fornecendo uma sólida base empírica para a formulação da proposta ergonômica.

#### 3. Análise e Interpretação dos Resultados.

Levantamento de Risco Ergonômico aplicado na Linha de Produção de Sabonetes

1.- Mantém posturas cervicais forçadas (flexão/extensão) por mais de 2 horas contínuas?

Tabela 1.- Frequência de posturas de pescoço forçado na linha de produção de sabão

Sim = 8	Sim = 67%
Não = 4	Não = 33%
Total	12

#### 1. Prevalência de posturas forçadas:

67% dos trabalhadores da linha de produção de sabão relatam manter posturas forçadas no pescoço por mais de 2 horas contínuas. Isto indica que uma maioria

significativa dos trabalhadores está exposta a este risco ergonómico.

#### 2. Impacto na saúde:

Manter posturas forçadas no pescoço por períodos prolongados pode levar a problemas de saúde, como dores musculares, tensão no pescoço e ombros e, potencialmente, distúrbios musculoesqueléticos a longo prazo.[26]

#### 3. Necessidade de intervenção:

Dada a elevada percentagem de trabalhadores afetados, é fundamental implementar medidas ergonómicas para reduzir este risco. Tal poderá incluir:

- **Reorganização da estação de trabalho:** Ajuste a altura das estações de trabalho e das ferramentas para minimizar a necessidade de flexionar ou estender o pescoço.
- **Pausas regulares:** Estabeleça pausas frequentes para que os trabalhadores possam mudar de postura e realizar exercícios de alongamento.
- **Formação em ergonomia:** Ministrar formação sobre posturas e técnicas corretas para evitar stress desnecessário.

2.- Mantém posturas forçadas do tronco (flexão/torção) por mais de 2 horas contínuas?

Tabela 2.- Frequência de posturas forçadas do tronco na linha de produção de sabão

Sim =	7	Sim =	58%
Não =	5	Não =	42%
Total	12		100%

#### 1. Prevalência de posturas forçadas do tronco:

- 58 % dos trabalhadores da linha de produção de sabão relatam manter posturas forçadas do tronco por mais de 2 horas contínuas. Isto indica que mais de metade dos trabalhadores estão expostos a este risco ergonómico.

#### 2. Impacto na saúde:

Manter posturas incômodas no tronco por períodos prolongados pode levar a problemas de saúde, como dor lombar, tensão lombar e distúrbios musculoesqueléticos potencialmente de longo prazo.

#### 3. Necessidade de intervenção:

- Dada a elevada percentagem de trabalhadores afetados, é fundamental implementar medidas ergonómicas para reduzir este risco. Tal poderá incluir:

- **Reorganização da estação de trabalho:** ajuste a altura das estações de trabalho e das ferramentas para minimizar a necessidade de flexionar ou torcer o tronco.
- **Pausas regulares:** Estabeleça pausas frequentes para que os trabalhadores possam mudar de postura e realizar exercícios de alongamento.



- **Formação em ergonomia:** Ministrar formação sobre posturas e técnicas corretas para evitar stress desnecessário.

3.- Você mantém os braços levantados acima do ombro por mais de 2 horas contínuas?

Tabela 3.- "Frequência de posturas forçadas de braço na linha de produção de sabão

Sim =	6	Sim =	50%
Não =	6	Não =	50%
	12		100%

**Interpretação:**

2. **Prevalência de posturas forçadas nos braços:**

- 50 % dos trabalhadores da linha de produção de sabão relatam manter os braços levantados acima do ombro por mais de 2 horas contínuas. Isto indica que metade dos trabalhadores está exposta a este risco ergonómico.

3. **Impacto na saúde:**

- Manter os braços elevados acima do ombro por longos períodos pode levar a problemas de saúde, como dor no ombro, aperto nos músculos do pescoço e do braço e potencialmente distúrbios musculoesqueléticos a longo prazo.

4. **Necessidade de intervenção:**

- Dada a percentagem significativa de trabalhadores afetados, é crucial implementar medidas ergonómicas para reduzir este risco. Tal poderá incluir:

- **Reorganização da estação de trabalho:** Ajuste a altura das estações de trabalho e ferramentas para minimizar a necessidade de levantar os braços.
- **Pausas regulares:** Estabeleça pausas frequentes para que os trabalhadores possam mudar de postura e realizar exercícios de alongamento.
- **Formação em ergonomia:** Ministrar formação sobre posturas e técnicas corretas para evitar stress desnecessário.

4.- Mantém os pulsos dobrados ou desviados por mais de 2 horas contínuas?

Tabela 4.- Frequência de posturas forçadas de punho na linha de produção de sabão

Sim =	8	Sim =	67%
Não =	4	Não =	33%
	12		100%

**Interpretação:**

1. **Prevalência de Posturas Forçadas no Pulso:**

- 67% dos trabalhadores da linha de sabão relatam manter os pulsos dobrados ou desviados por mais de 2 horas contínuas. Isto indica que uma maioria significativa dos trabalhadores está exposta a este risco ergonómico.

2. **Impacto na saúde:**

- Manter os pulsos dobrados ou desviados por períodos prolongados pode levar a problemas de

saúde, como dores no pulso, tensão nos músculos das mãos e braços e, potencialmente, distúrbios musculoesqueléticos a longo prazo.

3. **Necessidade de intervenção:**

- Dada a elevada percentagem de trabalhadores afetados, é fundamental implementar medidas ergonómicas para reduzir este risco. Tal poderá incluir:

- **Reorganização da estação de trabalho:** Ajuste a altura das estações de trabalho e das ferramentas para minimizar a necessidade de dobrar ou desviar os pulsos.
- **Pausas regulares:** Estabeleça pausas frequentes para que os trabalhadores possam mudar de postura e realizar exercícios de alongamento.
- **Formação em ergonomia:** Ministrar formação sobre posturas e técnicas corretas para evitar stress desnecessário.

5.- Realiza movimentos repetitivos dos braços/pulsos durante mais de 4 horas contínuas?

Tabela 5.- Frequência de movimentos repetitivos de braços/punhos na linha de produção de sabão

Sim =	5	Sim =	42%
Não =	7	Não =	58%
Total	12		100%

**Interpretação:**

1. **Prevalência de Movimentos Repetitivos:**

- 42 % dos trabalhadores da linha de produção de sabão relatam realizar movimentos repetitivos dos braços/punhos por mais de 4 horas contínuas. Isso indica que uma parcela significativa dos funcionários está exposta a esse risco ergonômico.

2. **Impacto na saúde:**

- Realizar movimentos repetitivos por períodos prolongados pode levar a problemas de saúde, como síndrome do túnel do carpo, tendinite e outros distúrbios musculoesqueléticos.

3. **Necessidade de intervenção:**

- Dada a percentagem considerável de trabalhadores afetados, é crucial implementar medidas ergonómicas para reduzir este risco. Tal poderá incluir:

- **Reorganização da estação de trabalho:** ajuste estações de trabalho e ferramentas para minimizar a necessidade de movimentos repetitivos.
- **Pausas regulares:** Estabeleça pausas frequentes para que os trabalhadores possam descansar e realizar exercícios de alongamento.
- **Formação em Ergonomia:** Ministrar formação sobre técnicas para evitar stress desnecessário e a importância de tarefas variadas.



6.- Levanta, empurra ou puxa manualmente cargas superiores a 25 kg?

Tabela 6.- Frequência de movimentação de cargas pesadas na linha de produção de sabão

Sim =	4	Sim =	33%
Não =	8	Não =	67%
Total	12		100%

**Interpretação:**

1. **Prevalência da movimentação de cargas pesadas:**

- 33 % dos trabalhadores da linha de produção de sabão relatam levantar, empurrar ou arrastar manualmente cargas de mais de 25 kg. Isso indica que uma parcela significativa dos funcionários está exposta a esse risco ergonômico.

2. **Impacto na saúde:**

- O manuseamento de cargas pesadas por períodos prolongados pode conduzir a problemas de saúde como dores lombares, lesões lombares e outras perturbações músculo-esqueléticas.

3. **Necessidade de intervenção:**

- Dada a percentagem considerável de trabalhadores afetados, é crucial implementar medidas ergonómicas para reduzir este risco. Tal poderá incluir:

- **Utilização de equipamento de assistência:** Fornecer ferramentas e equipamentos que ajudem a levantar e mover cargas pesadas.
- **Treinamento de Técnicas de Elevação:** Fornecer treinamento sobre técnicas corretas para levantar e mover cargas pesadas.
- **Reorganização da estação de trabalho:** ajuste as estações de trabalho para minimizar a necessidade de levantar ou mover cargas pesadas manualmente.

7.- Você levanta cargas do chão ou sobre o ombro?

Tabela 7.- Frequência de Elevação de Cargas do Solo ou sobre o Ombro na Linha de Produção de Sabão

Sim =	2	Sim =	17%
Não =	10	Não =	83%
Total	12		100%

**Interpretação:**

1. **Prevalência de Elevadores do Solo ou Sobre o Ombro:**

- 17 % dos trabalhadores da linha de produção de sabão relatam levantar cargas do solo ou sobre o ombro. Isto indica que uma minoria de trabalhadores está exposta a este risco ergonômico.

2. **Impacto na saúde:**

- Realizar levantamentos do chão ou sobre o ombro pode levar a problemas de saúde, como dor lombar, lesões nas costas e outros distúrbios musculoesqueléticos.

3. **Necessidade de intervenção:**

- Embora a percentagem de trabalhadores afetados seja inferior, é importante implementar medidas ergonómicas para reduzir este risco. Tal poderá incluir:

- **Utilização de equipamento de assistência:** Fornecer ferramentas e equipamentos que ajudem a levantar e mover cargas do solo ou sobre o ombro.
- **Treinamento de Técnicas de Elevação:** Fornecer treinamento sobre técnicas corretas para levantar e mover cargas do solo ou sobre o ombro.
- **Reorganização da estação de trabalho:** ajuste as estações de trabalho para minimizar a necessidade de levantar cargas do solo ou sobre o ombro.

8.- Está exposto a vibrações na mão/braço durante mais de 2 horas contínuas?

Tabela 8.- Frequência de Exposição a Vibrações Mão/Braço na Linha de Produção de Sabão

Sim =	2	Sim =	17%
Não =	10	Não =	83%
Total	12		100%

**Interpretação:**

1. **Prevalência da Exposição a Vibrações:**

- 17% dos trabalhadores da linha de produção de sabão relatam estar expostos a vibrações nas mãos/braços por mais de 2 horas contínuas. Isto indica que uma minoria de trabalhadores está exposta a este risco ergonômico.

2. **Impacto na saúde:**

- A exposição prolongada à vibração mão/braço pode levar a problemas de saúde, como a síndrome da vibração mão-braço, que pode causar dormência, formigueiro e perda de força nas mãos e braços.

3. **Necessidade de intervenção:**

- Embora a percentagem de trabalhadores afetados seja inferior, é importante implementar medidas ergonómicas para reduzir este risco. Tal poderá incluir:

- **Utilização de ferramentas anti-vibração:** Fornecer ferramentas e equipamentos concebidos para minimizar a exposição à vibração.
- **Pausas regulares:** Estabeleça pausas frequentes para que os trabalhadores possam descansar e reduzir a exposição a vibrações.
- **Formação em Ergonomia:** Ministrar formação sobre técnicas para minimizar a exposição a vibrações e a importância da utilização de equipamentos de proteção individual.

9.- Está exposto a temperaturas extremas (calor ou frio) no seu local de trabalho?

Tabela 9.- Frequência de Exposição a Temperaturas Extremas na Linha de Produção de Sabão

Sim =	3	Sim =	25%
Não =	9	Não =	75%
Total	12		100%

**Interpretação:**



## 1. Prevalência de Exposição a Temperaturas Extremas:

- 25 % dos trabalhadores na linha de produção de sabão relatam estar expostos a temperaturas extremas em seu local de trabalho. Isso indica que uma parcela significativa dos funcionários está exposta a esse risco ergonômico.

## 2. Impacto na saúde:

- A exposição prolongada a temperaturas extremas pode levar a problemas de saúde como stress térmico, desidratação, hipotermia ou insolação, dependendo se a temperatura é extremamente fria ou quente.

## 3. Necessidade de intervenção:

- Dada a percentagem considerável de trabalhadores afetados, é crucial implementar medidas ergonómicas para reduzir este risco. Tal poderá incluir:

- Controlo de Temperatura:** Implementar sistemas de controlo de temperatura na área de trabalho para manter um ambiente confortável.
- Equipamento de proteção individual:** Fornecer vestuário e equipamento adequados para proteger os trabalhadores de temperaturas extremas.
- Pausas regulares:** Estabeleça pausas frequentes para que os trabalhadores possam descansar e recuperar da exposição a temperaturas extremas.

10.- Considera que os níveis de iluminação na sua área de trabalho são inadequados?

Tabela 10.- "Frequência de iluminação inadequada na linha de produção de sabão

Sim =	7	Sim =	58%
Não =	5	Não =	42%
Total	12		100%

## Interpretação:

### 1. Prevalência de iluminação inadequada:

- 58% dos trabalhadores da linha de produção de sabão consideram os níveis de iluminação na sua área de trabalho inadequados. Isto indica que uma maioria significativa dos trabalhadores está exposta a este risco ergonómico.

### 2. Impacto na saúde:

- Uma iluminação inadequada pode levar a problemas de saúde, como cansaço ocular, dores de cabeça e diminuição da produtividade devido à dificuldade em ver com clareza.

### 3. Necessidade de intervenção:

- Dada a elevada percentagem de trabalhadores afetados, é fundamental implementar medidas ergonómicas para melhorar a iluminação na área de trabalho. Tal poderá incluir:
  - Melhoria da iluminação:** Instale sistemas de iluminação adequados que forneçam luz

uniforme e suficiente em todas as áreas de trabalho.

- Avaliação regular:** Realizar avaliações regulares dos níveis de iluminação para garantir que cumprem as normas ergonómicas.
- Formação em Ergonomia:** Ministrar formação sobre a importância de uma boa iluminação e como ajustar os postos de trabalho para otimizar a luz disponível.

11.- Está exposto a elevados níveis de ruído no seu local de trabalho?

Tabela 11.- Frequência de Exposição a Altos Níveis de Ruído na Linha de Produção de Sabão

Sim =	6	Sim =	50%
Não =	6	Não =	50%
Total	12		100%

## Interpretação:

### 1. Prevalência de Exposição a Alto Ruído:

- 50% dos trabalhadores da linha de produção de sabão relatam estar expostos a altos níveis de ruído em seu local de trabalho. Isto indica que metade dos trabalhadores está exposta a este risco ergonómico.

### 2. Impacto na saúde:

- A exposição prolongada a níveis elevados de ruído pode levar a problemas de saúde como perda de audição, stress, fadiga e diminuição da concentração e produtividade.

### 3. Necessidade de intervenção:

- Dada a percentagem significativa de trabalhadores afetados, é crucial implementar medidas ergonómicas para reduzir este risco. Tal poderá incluir:

- Controlo de Ruído:** Implementar sistemas de controlo de ruído na área de trabalho para reduzir os níveis de ruído.
- Equipamento de proteção individual:** Fornecer proteção auditiva adequada aos trabalhadores expostos a níveis elevados de ruído.
- Avaliação regular:** Realizar avaliações regulares dos níveis de ruído para garantir que cumprem as normas ergonómicas.

12.- Realiza tarefas repetitivas sem variações ao longo do seu dia de trabalho?

Tabela 12.- Frequência de Tarefas Repetitivas sem Variação na Linha de Produção de Sabão

Sim =	10	Sim =	83%
Não =	2	Não =	17%
Total	12		100%

## Interpretação:

### 1. Prevalência de Tarefas Repetitivas:

- 83% dos trabalhadores da linha de produção de sabão relatam realizar tarefas repetitivas sem variação ao longo da jornada de trabalho. Isto indica



que a grande maioria dos trabalhadores está exposta a este risco ergonómico.

## 2. Impacto na saúde:

- Realizar tarefas repetitivas sem variação pode levar a problemas de saúde como fadiga muscular, estresse e distúrbios musculoesqueléticos devido à falta de movimento e variação nas atividades.

## 3. Necessidade de intervenção:

- Dada a elevada percentagem de trabalhadores afetados, é fundamental implementar medidas ergonómicas para reduzir este risco. Tal poderá incluir:
  - Rotação de tarefas:** Implemente um sistema de rotação de tarefas para que os trabalhadores possam mudar de atividades e reduzir a monotonia.
  - Pausas regulares:** Estabeleça pausas frequentes para que os trabalhadores possam descansar e realizar exercícios de alongamento.
  - Formação em Ergonomia:** Ministrar formação sobre a importância de várias tarefas e técnicas para evitar stress desnecessário.

13.- Tem pausas ou pausas suficientes durante o seu dia de trabalho?

Tabela 13.- Frequência de Pausas Suficientes durante o Dia de Trabalho na Linha de Produção de Sabão

Sim =	8	Sim =	67%
Não =	4	Não =	33%
Total	12		100%

Interpretação:

### 1. Prevalência de pausas suficientes:

- 67% dos trabalhadores na linha de produção de sabão relatam ter pausas ou pausas suficientes durante o dia de trabalho. Isto indica que uma maioria significativa dos trabalhadores tem acesso a pausas adequadas.

## 2. Impacto na saúde:

- Ter pausas suficientes é crucial para a saúde e o bem-estar dos trabalhadores, uma vez que reduz a fadiga, melhora a concentração e previne perturbações músculo-esqueléticas.

## 3. Necessidade de intervenção:

- Embora a maioria dos trabalhadores relatem ter pausas suficientes, é importante garantir que todos os funcionários tenham acesso a pausas adequadas. Tal poderá incluir:

- Revisão da política de quebra:** certifique-se de que as políticas de quebra sejam apropriadas e aplicadas de forma consistente.
- Formação em Ergonomia:** Ministrar formação sobre a importância das pausas e como utilizá-las eficazmente para reduzir a fadiga e melhorar a saúde.

14.- Recebeu formação em ergonomia?

Tabela 14.- Frequência de Treinamento em Ergonomia na Linha de Produção de Sabão

Sim =	0	Sim =	0%
Não =	12	Não =	100%
Total	12		100%

Interpretação:

### 1. Prevalência da Formação em Ergonomia:

- 0 % dos trabalhadores da linha de produção de sabão referem ter recebido formação ou formação em ergonomia. Isso indica que nenhum dos funcionários foi treinado neste aspecto crucial da saúde ocupacional.

## 2. Impacto na saúde:

- A falta de formação em ergonomia pode levar a uma maior incidência de problemas de saúde relacionados com o trabalho, tais como perturbações músculo-esqueléticas, devido à falta de conhecimentos sobre posturas e técnicas corretas para evitar esforços desnecessários.

## 3. Necessidade de intervenção:

- Uma vez que nenhum dos trabalhadores recebeu formação em ergonomia, é crucial implementar programas de formação para todos os colaboradores. Tal poderá incluir:

- Programas de Formação em Ergonomia:** Desenvolver e implementar programas de formação que abranjam aspectos fundamentais da ergonomia e como aplicá-los no local de trabalho.
- Avaliações regulares:** Realizar avaliações regulares para garantir que os trabalhadores estão aplicando corretamente os princípios ergonómicos.

15.- Já sentiu dores musculares, lesões ou desconforto relacionados com o seu trabalho?

Tabela 15.- Frequência de dores musculares e lesões relacionadas ao trabalho na linha de produção de sabão

Sim =	12	Sim =	100%
Não =	0	Não =	0%
Total	12		100%

Interpretação:

### 1. Prevalência de Dores e Lesões Musculares:

- 100% dos trabalhadores da linha de produção de sabonetes relatam sentir dores musculares, lesões ou desconforto relacionados ao seu trabalho. Isso indica que todos os funcionários são afetados por problemas de saúde relacionados ao seu trabalho.

## 2. Impacto na saúde:

- A alta prevalência de dores e lesões musculares sugere que as condições de trabalho atuais estão contribuindo significativamente para problemas de saúde entre os funcionários.

## 3. Necessidade de intervenção:

- Uma vez que todos os trabalhadores são afetados, é crucial implementar medidas ergonómicas para melhorar as condições de trabalho e reduzir a



incidência de problemas de saúde. Tal poderá incluir:

- Avaliação ergonómica:** Realizar uma avaliação ergonómica completa do local de trabalho para identificar e corrigir fatores de risco.
- Programas de saúde e bem-estar:** Implemente programas de saúde e bem-estar que incluam exercícios de alongamento, técnicas de relaxamento e outros métodos para reduzir o estresse e a tensão muscular.
- Formação em Ergonomia:** Ministrar formação contínua sobre ergonomia e como aplicar os seus princípios no local de trabalho.

Tabela de teste qui-quadrado: valor de significância assintótica (bilateral)

	P5	Pág. 6	Pág. 8	Pág. 10	Pág. 11	Pág. 13
Pág. 2						0,038
P3	0,003			0,003	0,001	
P4		0,03				
P5				0,001	0,003	
Pág. 7			0,001			
Pág. 10					0,003	

Tabela de medidas simétricas: Cramer's V

	P5	Pág. 6	Pág. 8	Pág. 10	Pág. 11	Pág. 13
Pág. 2						0,598
P3	0,845			0,845	1	
P4		0,625				
P5				1	0,845	
Pág. 7			1			
Pág. 10					0,845	

Tabela de medidas direcionais: Lambda

	P5	Pág. 6	Pág. 8	Pág. 10	Pág. 11	Pág. 13
Pág. 2						0,4
P3	0,833			0,833	1	
P4		0,5				
P5				1	0,8	
Pág. 7			1			
Pág. 10					0,8	

### Análise detalhada dos resultados estatísticos

#### 1. Teste Qui-quadrado ( $\chi^2$ ) - Significância assintótica:

Este teste revela padrões de associação estatisticamente significativos ( $\alpha = 0,05$ ) entre variáveis dicotômicas, destacando:

Associações altamente significativas ( $p \leq 0,001$ ):

- P3-P11:  $p = 0,001$
- P5-P10:  $p = 0,001$
- P7-P8:  $p = 0,001$

Associações muito significativas ( $0,001 < p \leq 0,003$ ):

- P3-P5:  $p = 0,003$
- P3-P10:  $p = 0,003$

- P5-P11:  $p = 0,003$
- P10-P11:  $p = 0,003$

Associações significativas ( $0,003 < p < 0,05$ ):

- P4-P6:  $p = 0,03$
- P2-P13:  $p = 0,038$

Destaque:

- A concentração de p-valores  $\leq 0,003$  sugere relações robustas e não aleatórias entre as variáveis analisadas.
- A distribuição da significância indica um padrão sistemático nas respostas dos trabalhadores.

#### 2. Medições Simétricas - Cramer's V:

Este coeficiente normalizado (0-1) revela a intensidade das associações:

Associações perfeitas ( $V = 1$ ):

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

Associações muito fortes ( $V = 0,845$ ):

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

Associações moderadas:

- P4-P6:  $V = 0,625$
- P2-P13:  $V = 0,598$

Destaque:

- A presença de múltiplos coeficientes  $V \geq 0,845$  indica um alto grau de consistência nas respostas.
- Associações perfeitas ( $V = 1$ ) sugerem sincronização completa entre certos aspectos ergonômicos avaliados.

#### 3. Medidas direcionais - Lambda ( $\lambda$ ):

Este coeficiente preditivo revela a capacidade de reduzir o erro na previsão:

Previsibilidade perfeita ( $\lambda = 1$ ):

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

Previsibilidade muito elevada ( $\lambda \geq 0,8$ ):

- P3-P5:  $\lambda=0,833$
- P3-P10:  $\lambda=0,833$
- P5-P11:  $\lambda=0,8$
- P10-P11:  $\lambda=0,8$

Previsibilidade moderada:

- P4-P6:  $\lambda=0,5$
- P2-P13:  $\lambda=0,4$

#### Aspectos relevantes a destacar:

##### 1. Consistência Tripartida:

A convergência das três estatísticas ( $\chi^2$ , V de Cramer e Lambda) em valores ótimos para determinados pares de variáveis (especialmente P3-P11, P5-P10 e P7-P8) sugere a presença de padrões ergonômicos



fundamentais que requerem atenção prioritária no desenho da proposta de melhoria.

#### 2. Gradiente de Associações:

Observa-se um claro padrão hierárquico nas associações, do perfeito ao moderado, o que permite priorizar aspectos específicos na intervenção ergonômica.

#### 3. Robustez estatística:

A consistência entre as três diferentes medidas estatísticas fortalece a validade dos resultados, minimizando a probabilidade de associações espúrias.

#### 4. Implicações preditivas:

Os altos valores de Lambda ( $\geq 0,8$ ) em relações múltiplas sugerem que intervenções em certos aspectos ergonômicos podem ter efeitos previsíveis e significativos em outros aspectos relacionados.

#### 5. Estruturação das Intervenções:

Os resultados fornecem uma base empírica sólida para a estruturação hierárquica das intervenções ergonômicas, permitindo uma abordagem sistemática e baseada em evidências para a melhoria das condições físicas na linha de produção.

### 4. Discussão

Os resultados da pesquisa sobre riscos ergonômicos na linha de produção de sabão revelam uma prevalência significativa de posturas forçadas, movimentos repetitivos e movimentação de cargas, o que confirma as hipóteses inicialmente levantadas sobre a existência de condições de trabalho que podem afetar negativamente a saúde dos trabalhadores.

### Interpretação dos Resultados

#### 1. Posturas Forçadas:

- Pescoço e Tronco:** 67% e 58% dos trabalhadores, respectivamente, relataram manter posturas forçadas por mais de 2 horas contínuas. Esses achados são consistentes com estudos anteriores que indicam que posturas prolongadas podem levar a distúrbios musculoesqueléticos (LME), como tendinite e lombalgia. A literatura sugere que a sobrecarga biomecânica e a redução do fluxo sanguíneo nos tecidos afetados são fatores críticos no desenvolvimento dessas patologias.

#### 2. Movimentos Repetitivos:

- 42% dos trabalhadores realizam movimentos repetitivos dos braços e punhos por mais de 4 horas contínuas. Este resultado é consistente com pesquisas que associam movimentos repetitivos à síndrome do túnel do carpo e outras lesões por esforços repetitivos. A quantificação destes movimentos e a sua relação com a duração e frequência é crucial para compreender o impacto na saúde ocupacional.

#### 3. Movimentação de Carga:

- Cerca de 33% dos trabalhadores manuseiam manualmente cargas superiores a 25 kg, o que está

em consonância com os estudos que destacam o risco de lesões lombares e outras lesões musculoesqueléticas associadas à movimentação manual de cargas pesadas. A equação NIOSH revista fornece um quadro para avaliar estes riscos e estabelecer limites admissíveis.

#### 4. Fatores ambientais:

- A exposição a vibrações e temperaturas extremas relatada por 17% e 25% dos trabalhadores, respectivamente, destaca a importância de considerar os fatores ambientais na avaliação ergonômica. A literatura indica que as vibrações podem afetar a microcirculação tecidual e a condução nervosa, enquanto temperaturas extremas podem alterar a capacidade muscular e a precisão motora.

#### 5. Iluminação e Ruído:

- 58% dos trabalhadores consideram os níveis de iluminação inadequados e 50% estão expostos a níveis de ruído elevados. Esses fatores podem contribuir para o cansaço ocular, dores de cabeça e perda auditiva, afetando a produtividade e o bem-estar geral.

### Comparação com Estudos Anteriores

Os resultados obtidos nesta pesquisa são consistentes com estudos anteriores na indústria de transformação, que documentaram a alta prevalência de lesões musculoesqueléticas devido a condições ergonômicas inadequadas. Os dados epidemiológicos sugerem que cerca de 65% dos trabalhadores industriais sofrem de alguma forma de lesões musculoesqueléticas durante a sua vida profissional 1. Além disso, a relação entre posturas forçadas prolongadas e o desenvolvimento de patologias ocupacionais tem sido bem documentada, com estudos mostrando um aumento de 60% no risco de lesões crônicas devido à exposição sustentada a ângulos articulares extremos.[27][28]

### Implicações dos Resultados

#### 1. Saúde e Bem-Estar dos Trabalhadores:

- A elevada prevalência de lesões musculoesqueléticas e de outros problemas de saúde entre os trabalhadores sublinha a necessidade urgente de implementar medidas ergonómicas eficazes. A falta de formação em ergonomia, referida por 100% dos trabalhadores, evidencia uma área crítica de intervenção.

#### 2. Produtividade e Eficiência Operacional:

- Condições ergonômicas inadequadas não afetam apenas a saúde dos trabalhadores, mas também a produtividade e a eficiência das operações. Reduzir a fadiga e o stress através de melhorias ergonómicas pode ter um impacto positivo significativo na produtividade.

#### 3. Propostas de melhoria:

- Os resultados fornecem uma base empírica sólida para o desenvolvimento de uma proposta ergonômica abrangente. As intervenções devem incluir a reorganização dos postos de trabalho, pausas regulares, utilização de equipamento de assistência e programas de formação em ergonomia.[29]

Por todo o exposto, pode-se dizer que os resultados desta pesquisa confirmam as hipóteses levantadas sobre os riscos ergonômicos na linha de produção de sabão e seu impacto na saúde dos trabalhadores. A comparação com estudos anteriores reforça a validade desses achados e ressalta a necessidade de intervenções ergonômicas proativas. A aplicação de uma proposta ergonômica abrangente pode melhorar significativamente as condições de trabalho, reduzindo o risco de lesões musculoesqueléticas e melhorando a produtividade e o bem-estar dos trabalhadores.

### 5.- Conclusões

A presente pesquisa revelou achados significativos sobre os riscos ergonômicos na linha de produção de sabão, destacando a alta prevalência de posturas incômodas, movimentos repetitivos e movimentação de cargas pesadas. Estes fatores contribuem para uma elevada incidência de lesões músculo-esqueléticas (LME) entre os trabalhadores, confirmando as hipóteses inicialmente levantadas. As provas obtidas sublinham a necessidade urgente de implementar medidas ergonômicas eficazes para melhorar as condições de trabalho e reduzir o risco de lesões.

Um dos principais achados é que 67% dos trabalhadores mantêm posturas forçadas do pescoço por mais de 2 horas contínuas, e 58% mantêm posturas forçadas do tronco. Estes resultados são consistentes com estudos anteriores que associam posturas prolongadas a um risco aumentado de lesões musculoesqueléticas, tais como tendinites e lombalgias. A sobrecarga biomecânica e a redução do fluxo sanguíneo nos tecidos afetados são fatores críticos no desenvolvimento destas patologias, o que realça a importância de intervenções ergonômicas específicas.

A pesquisa também identificou que 42% dos trabalhadores realizam movimentos repetitivos dos braços e punhos por mais de 4 horas continuamente, e 33% manuseiam manualmente cargas de mais de 25 kg. Estes resultados são alarmantes, uma vez que os movimentos repetitivos e o manuseamento de cargas pesadas estão intimamente ligados à síndrome do túnel do carpo e a outras lesões por esforços repetitivos. A implementação de equipes de apoio e a reorganização dos postos de trabalho são medidas essenciais para mitigar estes riscos.

Além disso, a exposição a fatores ambientais adversos, como vibrações e temperaturas extremas, afeta 17% e 25% dos trabalhadores, respectivamente. Estes fatores podem

alterar a capacidade muscular e a precisão motora, aumentando o risco de lesões. A melhoria das condições ambientais no local de trabalho é crucial para proteger a saúde dos trabalhadores e otimizar o seu desempenho.

A importância desta investigação reside no seu contributo para a ergonomia nas pequenas empresas, onde os riscos ergonômicos são frequentemente subestimados. Os resultados fornecem uma base empírica sólida para o desenvolvimento de propostas ergonômicas abrangentes que atendam às necessidades específicas da linha de produção de sabão. A implementação destas propostas não só melhorará a saúde e o bem-estar dos trabalhadores, mas também poderá aumentar a produtividade e a eficiência operacional da empresa.

Finalmente, esta investigação tem importantes implicações para estudos futuros no campo da ergonomia. Os resultados destacam áreas críticas que requerem atenção contínua e sugerem a necessidade de investigação longitudinal para avaliar a eficácia das intervenções ergonômicas a longo prazo. Além disso, os métodos e abordagens utilizados neste estudo podem servir de modelo para pesquisas semelhantes em outras indústrias, contribuindo para o desenvolvimento de práticas ergonômicas mais seguras e eficazes globalmente.

### 6.- Contribuição dos autores.

1. Conceituação: Elizabeth Castro Rosales; Ashly Dayanna Torres Alvarado; Luis Stalin Zalamea Cedeño.
2. Curadoria de dados: Francisco Javier Duque-Aldaz, Fernando Raúl Rodríguez-Flores.
3. Análise formal: Luis Stalin Zalamea Cedeño; Francisco Javier Duque-Aldaz, Fernando Raúl Rodríguez-Flores.
4. Aquisição de fundos: N/A.
5. Investigação: Gênesis Elizabeth Castro Rosales; Ashly Dayanna Torres Alvarado.
6. Metodologia: Luis Stalin Zalamea Cedeño; Francisco Javier Duque-Aldaz, Fernando Raúl Rodríguez-Flores.
7. Gestão de projetos: N/A.
8. Recursos: N/A.
9. Software: N/A.
10. Supervisão: Francisco Javier Duque-Aldaz, Fernando Raúl Rodríguez-Flores
11. Validação: Luis Stalin Zalamea Cedeño; Francisco Javier Duque-Aldaz.
12. Visualização: Gênesis Elizabeth Castro Rosales; Ashly Dayanna Torres Alvarado; Luis Stalin Zalamea Cedeño.
13. Redação - rascunho original: Elizabeth Castro Rosales; Ashly Dayanna Torres Alvarado; Luis Stalin Zalamea Cedeño.
14. Redação - revisão e edição: Luis Stalin Zalamea Cedeño; Francisco Javier Duque-Aldaz, Fernando Raúl Rodríguez-Flores.

## 7.- Referências.

- [1] F. J. Duque-Aldaz, F. R. Rodríguez-Flores e J. Carmona Tapia, «Identificação de parâmetros em sistemas de equações diferenciais ordinárias através do uso de redes neurais artificiais», *Revista San Gregorio*, vol. 1, nº 2, pp. 15-23, 2025.
- [2] S. Guillén Prieto, M. A. Avila Solis e R. P. Sánchez Figueredo, «Manifestations of musculoskeletal disorders in metallurgical manual moulders», *Revista Información Científica*, vol. 103, 2024.
- [3] P. Ramírez Jaramillo, L. F. Bonilla Mendoza, J. C. Buitrago Salazar, S. Munera Ramírez, M. L. Uribe Quintero, M. D. Noguera Cabrales, I. Molina Restrepo e M. O. Garzón Duque, "Musculoskeletal disorders in a coffee-picking population", *Revista Colombiana de Salud Ocupacional*, vol. 12, nº 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, nº 2, p. 41-48, 2024.
- [5] E. Guzmán Soria, M. T. de la Garza Carranza, Q. Atlatenco Ibarra e A. Terrones Cordero, "The Manufacturing Industry in Mexico: An Analysis of Its Productivity and Efficiency, 1993-2020", *Economy, Society, and Territory*, vol. 24, no. 74, 2024.
- [6] M. Escalante, M. Nuñez Bottini e H. Izquierdo Ojeda, «Avaliação ergonómica na produção. Estudo de caso: Setor do Alumínio, Estado de Bolívar. Venezuela.», *Engenharia Industrial. Actualidad y Nuevas Tendencias*, vol. 6, nº 21, pp. 73-90, 2018.
- [7] F. Duque-Aldaz, E. Pazán Gómez, W. Villamagua Castillo e A. López Vargas, «Occupational health and safety management system according to ISO:45001 in cosmetic and natural laboratory», *Scientific Journal Science and Technology*, vol. 24, nº 41, 2024.
- [8] R. Molina, I. S. Galarza-Cachigüango, C. J. Villegas-Estévez e P. X. López-Egas, «EVALUATION OF ERGONOMIC RISKS AT WORK IN CATERING COMPANIES», *Turismo e Sociedade*, vol. 23, pp. 101-123, 2018.
- [9] S. P. Angulo Martínez, Y. J. Valencia Quintero, L. M. Rivera Huertas e L. Gómez Salazar, "Observational ergonomic methods for the evaluation of the biomechanical risk associated with musculoskeletal disorders of the upper limbs in workers 2014-2019", *Revista Colombiana de Salud Ocupacional*, vol. 10, nº 2, 2020.
- [10] F. J. Camacho e M. A. Rojas, «Ergonomic errors in a basic training course in microsurgery», *Revista da Faculdade de Medicina*, vol. 68, nº 4, pp. 499-504, 2020.
- [11] J. Rico Callado, «A metodologia de avaliação no AEVAL.», *Gestão e Análise de Políticas Públicas. Nova época*, nº 32, pp. 126-141, 2023.
- [12] N. S. Gavilanez-Dalgo, J. M. Orozco-Ramos, J. C. Moyano-Alulema e J. R. Brito-Carvajal, "Ergonomic Risk Assessment in Cocoa Producers", *Interdisciplinary Referee Journal Koinonia*, vol. 6, nº 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, «Avaliação e Proposta de um Sistema de Gestão Ambiental numa Plantação de Manga», *INQUIDE*, vol. 7, nº 1, p. 23-34, 2025.
- [14] R. SOLÍS-CARCAÑO, D. ZAVALA - BARRERA e S. AUDEVES-PÉREZ, "Avaliação Ergonômica em Obras de Construção no Sudeste do México", *Engenharia e Desenvolvimento*, vol. 41, n. 2, pp. 195-212, 2023.
- [15] Y. Rodríguez Ruiz e E. Pérez Mergarejo, «Macroergonomic diagnosis of Colombia organizations with the Ergonomics Maturity Model», *Revista Ciencias de la Salud*, vol. 14, pp. 11-25, 2016.
- [16] F. E. Obando Herrera e C. I. Maldonado Dávila, "Ergonomic diagnosis of postural changes and ergonomic risk assessment of a left-hand operator in the handling of a pedestal drill, with the use of the REBA, RULA and OCRA Checklist methods", *Industrial Data*, vol. 22, nº 2, 2019.
- [17] M. Henrich Saavedra e O. Rojas Lazo, «Applications of the TRIZ methodology in the ergonomic design of workstations», *Industrial Data*, vol. 16, nº 1, pp. 102-107, 2013.
- [18] J. E. Muñoz-Cardona, C. D. Muñoz-Cardona e O. A. Henao-Gallo, "Design of a Workstation for People with Upper Limb Disabilities Using a Brain-Computer Interface", *Tecno Lógicas*, pp. 55-66, 2013.
- [19] A. Rosa Sierra e F. J. González Madariaga, «APLICAÇÃO DA ERGONOMIA HÁPTICA AO DESIGN E DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS», *Revista Legado de Arquitetura y Diseño*, vol. 1, nº 13, pp. 9-19, 2013.
- [20] F. Duque-Aldaz, E. Pazán Gómez, W. Villamagua Castillo e A. López Vargas, "Occupational health and safety management system according to ISO:45001 in cosmetic and natural laboratory", *Scientific Journal Science and Technology*, vol. 24, nº 41, 2024.
- [21] M. P. Ormaza-Murillo, M. Félix-López, G. L. Real-Pérez e C. Parra-Ferié, «Procedure for the diagnosis of the physical design of jobs», *Ingeniería Industria*, vol. 36, nº 3, pp. 253-262, 2015.
- [22] A. G. Rodríguez-Hernández, R. Casares-Li, S. J. Viña-Brito e O. Rodríguez-Abril, «Diseño de ayudas al trabajadores del conocimiento», *Ingeniería Industrial*, vol. 36, nº 2, pp. 118-125, 2015.
- [23] F. Gómez Montón e J. L. López del Amo, «Lesões em professores de educação física na Catalunha: análise da percepção ergonómica no seu local de trabalho», *Apunts Educació Física y Deportes*, vol. 35, nº 135, pp. 48-67, 2019.
- [24] Y. Torres e Y. Rodríguez, "Emergência e Evolução da Ergonomia como Disciplina: Reflexões sobre a Escola de Fatores Humanos e a Escola de Ergonomia da Atividade", *Revista Facultad Nacional de Salud Pública*, vol. 39, nº 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 caca drying process by simple linear regression.», *INQUIDE*, vol. 6, nº 2, pp. 20-30, 2024.
- [26] V. E. García Casas, F. J. Duque-Aldaz e M. Cárdenas Calle, «Design of a plan of good manufacturing practices for restaurant cabins in the canton General Villamil Playas», *Journal of Research and Innovation*, vol. 8, nº 4, p. 58-76, 2023.
- [27] J. Ortiz, A. Bancovich Erquínigo, T. Candia Chávez, L. H. Palma Lisseth e L. Raez Guevara, "Ergonomic method to reduce the level of risk of musculoskeletal disorders in a textile manufacturing SME in Lima - Peru", *Industrial Data*, vol. 25, nº 2, pp. 143-169, 2022.
- [28] L. Cuautle Gutiérrez, L. A. Uribe Pacheco e J. D. García Tepox, «Identificação e avaliação de riscos posturais num processo de acabamento de peças automóveis», *Revista Ciencias de la Salud*, vol. 19, nº 1, pp. 1-14, 2021.
- [29] A. Y. Aragón-Vásquez, E. D. Silva-Lugo, J. A. Nájera-Luna, M.-G. Jorge, F. J. Hernández e R. de la Cruz-Carrera, "Análise postural do trabalhador florestal em serrarias de El Salto, Durango, México", *Madera y bosques*, vol. 25, nº 3, p. e2531904, 2019.

## Aplicação de Estratégias Lean Não Automatizadas para Melhoria da Qualidade em Processos de Montagem Manuais: Um Estudo de Caso na Indústria de Linha Branca.

*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.*

Jayling Selena Fu-Lopez<sup>1</sup> \*; Jaime Patrício Fierro Aguilar<sup>2</sup> ; Fernando Raúl Rodríguez-Flores<sup>3</sup> & Francisco Javier Duque-Aldaz<sup>4</sup>

Recebido: 19/11/2024 – Aceito: 12/05/2025 – Publicado: 01/07/2025

Artigos de  
Investigação

Artigos de  
Revisão

Artigos de  
Ensaio

\* Autor correspondente.



### Resumo.

A gestão da qualidade em processos manuais de fabricação representa um desafio recorrente em plantas industriais sem automação, especialmente em países em desenvolvimento. O objetivo deste estudo foi analisar e reduzir defeitos na área de montagem de uma fábrica de fogões domésticos através de estratégias de melhoria não automatizadas. Foi desenvolvida uma pesquisa aplicada com abordagem quantitativa e delineamento não experimental, baseada em dados históricos de produção registrados durante 20 semanas. Os defeitos foram consolidados por tipo e semana, e uma simulação de redução progressiva do erro em três fases (1,5%, 2%, 3-4%) foi aplicada. Instrumentos como Microsoft Excel e SPSS foram utilizados para calcular frequências, taxas de rejeição e aceitação, índices de desempenho e análise de Pareto. Foram propostas melhorias alinhadas aos princípios do Lean Manufacturing adaptadas aos processos manuais: padronização visual, checklists, pontos de controle em processo, eventos Kaizen e reorganização ergonômica do layout. Os resultados indicaram que a aplicação simulada das estratégias de melhoria permitiu reduzir a produção total rejeitada de 9091 para 8795 unidades, o que representou uma melhoria de 3,25%. Houve também um aumento na taxa de aceitação e uma diminuição progressiva nos defeitos mais críticos. O manuseamento inadequado dos materiais e a montagem incorreta dos acessórios foram responsáveis por 65% do total de defeitos. Concluiu-se que é possível melhorar a qualidade nos processos de montagem manual através de intervenções de baixo custo, replicáveis em indústrias com recursos limitados.

### Palavras-chave.

Montagem Manual; Redução de Defeitos; Lean Manufacturing; Melhoria de Processos; Controlo de Qualidade; Produção não automatizada

### 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 ensamblaje 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.

## 1. Introdução

Hoje, a gestão da qualidade nos processos de fabricação continua sendo um desafio central para a engenharia de produção, especialmente em empresas que operam sem automação. Em muitos contextos industriais na América Latina, as linhas de montagem dependem quase exclusivamente de trabalho manual, o que aumenta a variabilidade do processo e aumenta a probabilidade de erro

humano. Este fenômeno é particularmente evidente nas médias empresas do setor da linha branca, onde a precisão na montagem de produtos como cozinhas domésticas é crucial para garantir o funcionamento e a satisfação do cliente.

A relevância deste estudo reside em seu foco em um ambiente real de produção manual, com recursos limitados,

<sup>1</sup> Universidade Politécnica Salesiana; [jfu@est.ups.edu.ec](mailto:jfu@est.ups.edu.ec) ; <https://orcid.org/0009-0002-0003-1424> ; Guayaquil; Equador.

<sup>2</sup> Universidade de Guayaquil; [jaime.fierroa@ug.edu.ec](mailto:jaime.fierroa@ug.edu.ec) ; <https://orcid.org/0000-0003-2725-8290> ; Guayaquil; Equador.

<sup>3</sup> Universidade de Havana; [fernán@matcom.uh](mailto:fernán@matcom.uh) ; <https://orcid.org/0009-0002-8275-7631> ; Havana; Cuba.

<sup>4</sup> Universidade de Guayaquil; [francisco.duquea@ug.edu.ec](mailto:francisco.duquea@ug.edu.ec) ; <https://orcid.org/0000-0001-9533-1635> ; Guayaquil; Equador.



operadores sem treinamento técnico e processos não automatizados, localizado na cidade de Guayaquil, Equador. A literatura especializada tem documentado extensivamente as vantagens dos sistemas automatizados e estratégias Lean em ambientes tecnológicos avançados; No entanto, existe uma lacuna na aplicação destes princípios em instalações com um baixo nível de tecnificação. Neste sentido, é essencial explorar como os fundamentos do pensamento Lean e da gestão da qualidade podem ser efetivamente adaptados a contextos de produção que não possuem automação ou software especializado.

O principal objetivo desta pesquisa é analisar a ocorrência de defeitos no processo de montagem manual de cozinhas domésticas, identificar suas causas mais frequentes e propor uma estratégia de melhoria progressiva baseada na redução sistemática de erros. Para isso, foi realizado um estudo longitudinal de 20 semanas, aplicando simulações de melhoria e estratégias como padronização visual, implementação de checklists, eventos Kaizen e pontos de controle intermediários. Desta forma, procura demonstrar que é possível reduzir significativamente o número de produtos rejeitados mesmo em ambientes com recursos tecnológicos mínimos.

Este estudo contribui para o avanço do conhecimento, oferecendo uma abordagem prática para aplicar ferramentas de melhoria contínua e controle de qualidade em condições manuais de fabricação. Além disso, apresenta evidências quantitativas sobre o impacto dessas estratégias na taxa de defeitos, fornecendo um modelo replicável para empresas com características semelhantes. Espera-se que os resultados desta pesquisa sirvam de referência para iniciativas de melhoria em contextos industriais emergentes, onde a otimização de processos sem automação é uma necessidade operacional e estratégica.

### 1.1.- Qualidade nos processos manuais de fabrico.

A qualidade nos processos manuais de fabrico baseia-se na capacidade do sistema produtivo de gerar produtos que cumpram as normas exigidas, apesar da elevada dependência do fator humano. Ao contrário dos processos automatizados, onde o controle é exercido através de sistemas mecânicos ou eletrônicos, em ambientes manuais a qualidade está diretamente relacionada à habilidade, atenção e experiência dos operadores. Esta condição introduz um maior grau de variabilidade, o que exige estratégias específicas para o seu controlo.[1]

Nestas condições, os métodos de garantia da qualidade devem centrar-se na prevenção da ocorrência de erros através de práticas como a normalização do trabalho, a inspeção visual, a formação contínua e o controlo no processo. A implementação de controlos de qualidade visando a deteção precoce e a intervenção atempada permite mitigar o impacto dos erros humanos, especialmente em atividades críticas como a montagem de componentes, onde

pequenos desvios podem gerar não conformidades significativas.[2][3]

A ausência de automatização significa que os sistemas de qualidade devem ser simples, visuais e de fácil aplicação por pessoal sem formação técnica especializada. Neste contexto, metodologias que combinam inspeção on-line com ferramentas visuais e listas de verificação são altamente eficazes. Estas práticas permitem manter a qualidade do produto dentro de limites aceitáveis, reduzindo o retrabalho e garantindo uma maior eficiência no fluxo de produção.[4]

Finalmente, reconhece-se que o controlo de qualidade em processos manuais requer uma abordagem mais humana e adaptativa. A comunicação constante, a liderança da fábrica e uma cultura organizacional orientada para a melhoria contínua são fatores determinantes para sustentar a qualidade. Portanto, a gestão da qualidade em ambientes manuais deve equilibrar a disciplina técnica com o desenvolvimento de soft skills, fortalecendo a responsabilidade individual e coletiva para a produção sem defeito.[5]

### 1.2.- Gestão de erros humanos em processos industriais

A gestão do erro humano nos processos industriais é um componente essencial dentro dos sistemas de garantia da qualidade, especialmente em ambientes de produção manual. Nestes contextos, a intervenção direta do operador no produto aumenta a probabilidade de erros devido a omissão, comissão, sequenciação ou manuseamento incorreto. Por esta razão, é essencial identificar as causas que geram essas falhas, a fim de implementar estratégias de mitigação eficazes.[6]

Os fatores que contribuem para o erro humano incluem fadiga física, falta de treinamento técnico, ambiguidade nas instruções, design inadequado do trabalho e pressão para cumprir as metas de produção. Em plantas industriais onde os trabalhadores não têm estudos técnicos formais, a probabilidade de incorrer em erros operacionais aumenta, especialmente se guias claras ou ferramentas de suporte visual não estiverem disponíveis. Este cenário exige uma abordagem proativa para prevenir erros em vez de corrigi-los.[7][8]

Uma das estratégias mais eficazes para gerenciar o erro humano é o desenho de processos que reduzam a complexidade operacional, incorporando princípios de ergonomia, padronização e feedback imediato. O uso de poka-yoke ou dispositivos à prova de erros, embora não necessariamente automatizados, pode ser integrado de forma artesanal por meio de guias mecânicas, moldes ou elementos de travamento físico. Da mesma forma, a formação contínua focada em erros históricos fortalece a consciência da qualidade e contribui para reduzir a reincidência.[9]

O desenvolvimento de uma cultura organizacional que entenda o erro como uma oportunidade de melhoria, e não como um fracasso pessoal, é fundamental para a evolução do sistema de produção. Isso envolve gerar espaços para análise, promover a participação ativa do operador na identificação de causas raiz e usar ferramentas como o diagrama de Ishikawa ou a análise dos cinco porquês para construir soluções a partir da base operacional. Em suma, a gestão do erro humano requer uma combinação de métodos técnicos e uma visão sistémica do comportamento humano dentro do processo industrial. [10][11]

### 1.3.- Lean Manufacturing adaptado a ambientes sem automação.

A abordagem de produção enxuta, ou Lean Manufacturing, tem sido amplamente adotada na indústria para otimizar processos, eliminar desperdícios e aumentar o valor entregue ao cliente. Embora muitas de suas ferramentas sejam comumente associadas a sistemas automatizados ou digitalizados, seus princípios fundamentais podem ser efetivamente adaptados a ambientes de produção manual. Nestes contextos, o desafio é aplicar as metodologias Lean de forma simplificada e com recursos limitados, preservando a sua essência de melhoria contínua e eliminação de atividades que não agregam valor. [12][13]

Uma das ferramentas Lean mais aplicáveis nesses ambientes é o Kaizen, que promove a melhoria incremental através da participação ativa do pessoal operacional. Reuniões Kaizen breves e regulares permitem identificar problemas diretamente da experiência do trabalhador, priorizar ações corretivas imediatas e fortalecer a cultura de melhoria contínua. Esta abordagem é adequada para instalações sem automação, onde o conhecimento empírico representa um recurso fundamental.[14]

Da mesma forma, a implementação de práticas como o sistema 5S, gestão visual e controle em processo (PQC), permite que o espaço de trabalho seja estruturado e facilite a execução padronizada de tarefas. Estes elementos contribuem para reduzir erros, minimizar tempos não produtivos e melhorar a qualidade, sem exigir investimento em tecnologia. Juntas, essas ferramentas podem aumentar a eficiência e o controle de qualidade em sistemas manuais de produção através de ações simples, mas consistentes.[15]

O pensamento lean, quando aplicado em contextos de fabricação não automatizados, também enfatiza a necessidade de treinar o operador como um agente de qualidade e melhoria. Através de mecanismos como checklists, job rotation e sinalização manual Andon, é possível criar um sistema de produção flexível, com a capacidade de se adaptar rapidamente e responder a desvios. Assim, promove-se uma organização que aprende e evolui de forma sustentável, mesmo sem dependência de automação ou software avançado. [16][17]

### 1.4.- Importância da padronização e visualização do trabalho

A padronização do trabalho é um dos pilares fundamentais para o controle de qualidade em sistemas de fabricação, especialmente naqueles que dependem fortemente do trabalho manual. Estabelecer procedimentos definidos, repetíveis e compreensíveis permite reduzir a variabilidade na execução de tarefas e minimizar o risco de erro humano. Esta prática é ainda mais crítica quando os operadores não têm formação técnica especializada, pois a ausência de critérios técnicos pode levar a interpretações subjetivas do processo.[18]

Neste contexto, o uso de instruções visuais apresenta-se como uma estratégia eficaz para facilitar a compreensão dos métodos operacionais. Recursos visuais, como diagramas, fotografias sequenciais e codificação de cores, permitem a rápida assimilação de atividades-chave, favorecendo a uniformidade do trabalho. Esta metodologia reduz a dependência de textos complexos ou procedimentos verbais, adaptando-se assim ao perfil educacional do pessoal operacional em instalações industriais sem automação.[19]

Da mesma forma, a visualização do trabalho contribui para o empoderamento dos operadores, pois promove a autonomia para seguir padrões e tomar decisões corretivas de forma proativa. Através da padronização visual, tanto o controle de qualidade na origem quanto a rastreabilidade do processo são fortalecidos, o que é essencial para detetar desvios precoces e evitar o avanço de produtos defeituosos para etapas posteriores de montagem. [20][21]

Estudos têm demonstrado que a implementação de trabalho padronizado, combinada com a visualização eficaz, pode reduzir significativamente os erros devido à omissão, sequência ou manuseio incorreto dos componentes. Além disso, ao estruturar o conhecimento tácito em documentos visuais acessíveis, facilita-se a transferência de competências entre trabalhadores e melhora-se a consistência dos resultados, mesmo em contextos de elevada rotatividade laboral ou de baixo nível de especialização técnica.[22]

### 1.5.- Indicadores de desempenho no controlo de qualidade e produtividade

Nos processos de fabrico, particularmente em ambientes manuais, os indicadores de desempenho permitem avaliar a eficiência operacional e a eficácia das estratégias de controlo de qualidade. A aplicação de métricas como taxa de rejeição e taxa de aceitação é essencial para identificar áreas críticas do processo produtivo. Estes indicadores, ao relacionarem a quantidade de produtos não conformes com o volume total de produção, fornecem uma visão quantitativa do nível de qualidade alcançado na planta.[23]

A taxa de aceitação (produção aceite entre produção rejeitada) e a taxa de rejeição (produção rejeitada entre produção aceite) permitem-nos aprofundar a análise do desempenho, uma vez que oferecem uma medida relativa que facilita comparações entre diferentes períodos ou linhas de produção. Estes índices são especialmente úteis em instalações não automatizadas, onde a intervenção humana tem um impacto direto nos resultados de qualidade. Quanto maior a taxa de aceitação, melhor o desempenho do sistema de produção em termos de conformidade. [24][25]

Além disso, a interpretação desses indicadores deve ser realizada em conjunto com dados sobre defeitos específicos, o que permite que análises do tipo Pareto sejam construídas para priorizar as causas mais significativas de não conformidades. O uso da análise de Pareto no controle de qualidade permite que os esforços de melhoria sejam focados nas poucas causas que geram a maioria dos defeitos, o que é consistente com os princípios de eficiência em sistemas de produção ajustados a recursos limitados. [26]

Estes indicadores são considerados ferramentas essenciais dentro dos sistemas de gestão da qualidade, pois facilitam a tomada de decisão com base em dados reais. Em ambientes sem automação, onde a capacidade de controlo online é reduzida, ter indicadores simples mas representativos permite estabelecer linhas de base, monitorizar intervenções e gerar feedback objetivo ao pessoal operacional e de supervisão. [27][28]

## 2. Materiais e métodos.

### 2.1. Descrição dos materiais e recursos

Esta pesquisa foi realizada em uma empresa de fabricação dedicada à fabricação de cozinhas domésticas, localizada na cidade de Guayaquil, Equador. O estudo centrou-se na área da montagem, onde os processos são manuais e executados por pessoal operacional constituído por homens e mulheres entre os 20 e os 40 anos de idade, com nível de ensino secundário e sem formação técnica ou universitária.

Não foi utilizada instrumentação especializada ou maquinaria automatizada, uma vez que a natureza do processo é inteiramente manual. Para o registro, organização e análise dos dados foram utilizados os seguintes instrumentos:

- Microsoft Excel (versão 2021): para tabulação de dados, simulações de redução percentual de defeitos, elaboração de tabelas comparativas e geração de gráficos.
- IBM SPSS Statistics (versão 25): para cálculos estatísticos descritivos, análise de frequência e validação de diferenças em variáveis associadas à produção defeituosa.

- Material documental interno da empresa: registos semanais de produção e controlo de qualidade, correspondentes ao período de junho a outubro.

### 2.2. Conceção do estudo

O estudo foi estruturado como uma pesquisa aplicada, de natureza quantitativa e delineamento não experimental, baseada na análise de dados históricos. Trabalhamos com uma abordagem longitudinal, utilizando um registo consolidado de 20 semanas consecutivas de operação, correspondentes aos meses de junho a outubro.

As variáveis do estudo foram definidas da seguinte forma:

- Variável dependente: produção total rejeitada por semana (unidades defeituosas).
- Variáveis independentes: tipos específicos de defeitos detetados (oito categorias definidas pela área de qualidade).
- Variáveis derivadas: taxa de rejeição, taxa de aceitação, taxa de aceitação, taxa de rejeição.

Uma simulação de melhoria progressiva (Tabela 2), consistindo em reduções percentuais semanais nos erros identificados, foi aplicada com três níveis de intervenção: 1,5% (semanas 1–4), 2% (semanas 5–12) e 3–4% (semanas 13–20), a fim de comparar os resultados projetados com os dados reais.

### 2.3. Procedimento

O procedimento desenvolvido incluiu as seguintes etapas:

- Coleta de dados: informações semanais sobre a produção aceita e rejeitada e categorização dos defeitos foram obtidas diretamente dos registros internos do sistema de controle de qualidade da empresa.
- Consolidação da base de dados: foi criada uma matriz Excel com as 20 semanas de produção, registrando cada tipo de defeito por semana e o volume total de produtos rejeitados.
- Simulação de cenário: aplicou-se uma simulação de redução progressiva de erros para as mesmas semanas, considerando diminuições controladas de defeitos com base em percentuais estabelecidos.
- Cálculo de indicadores de desempenho: foram calculadas taxas e taxas de aceitação e rejeição, tanto para os dados reais como para o cenário simulado.
- Comparação e análise: foi feita uma comparação entre os dois cenários para avaliar o impacto das reduções simuladas nos níveis de qualidade e desempenho operacional.

### 2.4. Análise dos dados

A análise dos dados foi realizada em duas fases. Primeiramente, aplicou-se estatística descritiva para obter frequências absolutas e relativas de cada tipo de defeito, distribuídas por semana. Posteriormente, foram calculados indicadores-chave de desempenho: taxa de rejeição, taxa de



aceitação, taxa de aceitação e taxa de rejeição, o que permitiu avaliar o impacto da proposta de melhoria.

Os dados foram processados e representados por meio de gráficos comparativos e análise de Pareto, a fim de visualizar as principais causas de defeitos e sua contribuição para a produção total rejeitada. A utilização da simulação percentual permitiu projetar cenários de melhoria realistas sem alterar as condições atuais do processo produtivo.

### 2.5. Considerações éticas

Esta pesquisa foi desenvolvida a partir de informações internas de natureza operacional, sem envolvimento direto do ser humano como sujeito de estudo. Não foram utilizados dados pessoais, clínicos ou sensíveis. A empresa autorizou a utilização dos seus registos de produção para fins académicos e de melhoria contínua.

## 3. Análise e Interpretação dos Resultados.

### 3.1.- Tabela de Análise 1: Distribuição Semanal de Defeitos no Processo de Montagem – Dados Originais.

A Tabela 1 mostra a distribuição semanal dos defeitos detetados na área de montagem durante um período de 20 semanas. No total, foram identificados oito tipos de defeitos recorrentes, com um acumulado de **9091 unidades rejeitadas**.

#### Defeitos mais frequentes

Os defeitos com maior incidência foram:

- **Manuseio inadequado de materiais:** 3189 unidades (35,08%)
- **Montagem incorreta de acessórios:** 2672 unidades (29,39%)

Juntos, esses dois defeitos representam aproximadamente 64% do total de rejeitos, evidenciando problemas significativos na execução de tarefas manuais críticas dentro do processo de montagem.

#### Semana mais crítica

A semana de 23 a 30 de setembro foi a mais problemática, registando um pico de 641 unidades rejeitadas, principalmente devido a soldas deficientes (265 unidades). Esta situação reflete uma falta de controlo sobre os processos mais sensíveis.

#### Observações na generalidade

- Foi identificada uma alta variabilidade semanal no número de defeitos, o que pode estar associado a condições operacionais não padronizadas ou treinamento insuficiente de pessoal.
- Os resultados refletem um sistema de produção altamente dependente do fator humano, com baixa automação e pouco treinamento técnico, o que aumenta a probabilidade de erros devido à movimentação e montagem manual.

- As fases críticas do processo – montagem, manuseio e fixações – são responsáveis pela maioria dos erros, sugerindo falhas nos procedimentos operacionais e no sistema de garantia de qualidade.
- A ausência de protocolos visuais e ferramentas de suporte provavelmente limita a capacidade dos operadores de executar suas tarefas com precisão e consistência.

### 3.2.- Tabela de Análise 2: Distribuição Semanal de Defeitos com Aplicação de Melhoria Progressiva.

A tabela apresenta os resultados após a aplicação de uma estratégia de melhoria gradual com o objetivo de reduzir defeitos na área de montagem durante um período de 20 semanas. A proposta consistia na aplicação de percentagens progressivas de redução, repartidas do seguinte modo:

- **Semanas 1–4:** redução de 1,5%
- **Semanas 5–12:** redução de 2%
- **Semanas 13–20:** redução de 3%, com um aumento para 4% nas últimas semanas

#### Resultados globais

- **Produção total rejeitada:** 8806 unidades, o que representa uma diminuição de 285 unidades em relação ao cenário original (melhoria de 3,13%).

#### Redução por tipo de defeito

- **Manuseamento inadequado de materiais:** de 3189 para 3101 unidades (redução de 88 unidades)
- **Montagem incorreta de acessórios:** de 2672 a 2596 unidades (redução de 76 unidades)
- **Uso incorreto de ferramentas especializadas:** de 348 para 330 unidades (redução de 18 unidades)

**Nota:** A mesma hierarquia é mantida para os defeitos mais frequentes, sugerindo que, embora tenha havido melhorias, as mesmas áreas críticas permanecem.

#### Observações e análise

A implementação de uma estratégia de tapering revelou-se eficaz, mesmo na ausência de automação, graças à utilização de intervenções de baixo custo, tais como:

- Formação do pessoal
- Supervisão estruturada
- Ferramentas de suporte visual
- Feedback contínuo ao operador

Esta abordagem valida a premissa da melhoria contínua (Kaizen), onde pequenas ações sustentadas geram impactos positivos na eficiência operacional. Embora os percentuais aplicados tenham sido conservadores, os resultados obtidos sugerem que o aumento da meta de redução (por exemplo, para 5% nos principais defeitos) poderia gerar melhorias mais notáveis.

Os erros mais frequentes não desaparecem sem uma intervenção específica, pelo que é essencial implementar

estratégias focadas nas principais causas de defeitos, especialmente ao nível do manuseamento de materiais e montagem de acessórios.

### 3.3.- Tabela de Análise 3: Análise de Frequência de Defeitos no Processo de Montagem – Dados Originais.

A Tabela 3 apresenta um resumo dos defeitos detetados na área de montagem, organizados de acordo com três parâmetros fundamentais:

- Frequência absoluta (quantidade total por tipo de defeito).
- Frequência relativa (percentagem do total de erros)
- Frequência cumulativa.

Observa-se que 64,47% de todos os defeitos estão concentrados em apenas duas causas: manuseio inadequado de materiais e montagem incorreta de acessórios. Esta distribuição confirma a validade do princípio de Pareto no contexto industrial, uma vez que uma pequena proporção de causas gera a maioria dos problemas de qualidade.

Além disso, os defeitos estão principalmente relacionados com erros humanos, com origem na falta de competências técnicas por parte do pessoal operacional. Esta situação é reforçada pelo perfil dos trabalhadores, a maioria dos quais não possui formação técnica ou ensino superior, o que aumenta a vulnerabilidade do processo a tarefas que exigem critérios precisos e especializados.

A alta concentração de erros em atividades que dependem diretamente do julgamento do operador mostra a necessidade urgente de padronizar procedimentos, fortalecer o treinamento técnico e fornecer recursos visuais que facilitem a correta execução das tarefas.

Por outro lado, embora certos defeitos, como o uso incorreto de ferramentas ou a falta de lubrificação, sejam menos frequentes, não devem ser subestimados. Se não forem devidamente controlados, estes problemas podem escalar ao longo do tempo e tornar-se novas fontes de desperdício ou falhas críticas.

### 3.4.- Tabela de Análise 4: Análise da Frequência de Defeitos com Redução Progressiva.

A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos após a implementação de uma estratégia de melhoria gradual, baseada em reduções progressivas de 1,5%, 2%, 3% e 4% nos níveis de defeitos. Esta intervenção teve como objetivo reduzir erros no processo de montagem através de ações leves mas constantes.

Do ponto de vista técnico, observa-se uma diminuição global em todos os tipos de defeitos. O número total de erros passou de 9.091 para 8.806 unidades, o que representa uma melhoria de 3,13%. Esta redução, embora moderada, mostra o efeito positivo da aplicação de melhorias sistemáticas mesmo sem recorrer à automação.

No entanto, as proporções relativas dos defeitos permanecem praticamente estáveis, indicando que a estratégia foi aplicada uniformemente e não contemplou ações diferenciadas para atacar causas específicas. De facto, é detetado um ligeiro aumento na frequência relativa dos defeitos mais críticos, tais como o manuseamento inadequado do material e a montagem incorreta dos acessórios. Isto significa que, embora o número absoluto destes erros tenha sido reduzido, o seu peso no total manteve-se inalterado ou até aumentou ligeiramente.

Estes resultados confirmam a necessidade de complementar as melhorias gerais com um enfoque mais centrado nas causas profundas. O step-down é eficaz na geração de progresso sustentado, mas se as ações não forem implementadas especificamente visando os defeitos mais frequentes, sua persistência pode limitar o impacto real da melhoria contínua.

### 3.5.- Tabela de Análise 5: Indicadores Semanais de Desempenho Produtivo no Processo de Montagem – Dados Originais.

A Tabela 5 resume a produção total, aceita e rejeitada durante um período de 20 semanas. Além disso, inclui métricas-chave para avaliar o desempenho do processo, como taxa de rejeição, taxa de aceitação, taxa de aceitação (IA: produção aceita/produção rejeitada) e taxa de rejeição (RI: produção rejeitada/produção aceita).

Nesse período, foram registradas 9.091 unidades rejeitadas, o que representa uma taxa média de rejeição de 8,05%. As semanas mais críticas em termos de qualidade foram 1 a 7 de agosto (15,9% de rejeição), 8 a 15 de julho (13,4%) e 16 a 22 de outubro (13,0%), coincidindo com aumentos nos defeitos críticos relacionados à montagem e manuseio de materiais.

Em contrapartida, as semanas com melhor desempenho foram 16 a 22 de agosto e 8 a 15 de setembro, ambas com baixa taxa de rejeição de 4,6%, refletindo maior estabilidade no controle do processo.

A taxa média de aceitação foi de 12,42, enquanto a taxa de rejeição foi de 0,08. Estes valores evidenciam um processo que, embora maioritariamente eficiente, apresenta episódios de deterioração significativa que comprometem a estabilidade da produção.

A alta variabilidade nas taxas de rejeição revela inconsistências típicas de um sistema manual não padronizado. As flutuações nas taxas de aceitação – de níveis ótimos acima de 20 a valores preocupantes abaixo de 7 – sugerem deficiências nos métodos de acompanhamento e formação, que não parecem ser aplicados de forma contínua ou estruturada.



Esses resultados destacam a necessidade urgente de implementar métodos padronizados de melhoria contínua, bem como ferramentas padrão de controle visual e operador. Mesmo que a automatização não esteja disponível, estas medidas reduziriam a confiança na apreciação individual e melhorariam a estabilidade do processo a longo prazo.

### 3.6.- Tabela de Análise 6.- Indicadores Semanais de Desempenho Produtivo com Melhoria Progressiva no Controle de Defeito

A Tabela 6 apresenta os resultados de uma estratégia de melhoria contínua aplicada progressivamente ao longo de 20 semanas, com reduções escalonadas nos defeitos: 1,5% entre as semanas 1 e 4, 2% entre as semanas 5 e 12 e entre 3% e 4% nas semanas 13 a 20.

Como resultado desta intervenção, a produção total rejeitada foi reduzida para 8.795 unidades, em comparação com as 9.091 inicialmente registadas. Esta diminuição representa uma melhoria absoluta de 296 unidades, equivalente a uma redução de 3,25%. Paralelamente, a taxa média de rejeição diminuiu para aproximadamente 7,78%, enquanto a taxa de aceitação apresentou uma melhoria global, atingindo uma média de 12,68 em comparação com o valor original de 12,42. Além disso, observou-se um comportamento positivo na maioria das semanas, com melhorias na taxa de aceitação e maior estabilidade nos indicadores.

Do ponto de vista técnico, a simulação de reduções progressivas mostra que mesmo intervenções leves e sistemáticas podem gerar melhorias concretas nos indicadores de desempenho produtivo. Embora a percentagem de melhoria seja modesta, o impacto é significativo: a variabilidade na qualidade do processo é reduzida, a eficiência operacional é aumentada e uma maior estabilidade é alcançada em semanas anteriormente críticas.

Isso valida a abordagem de melhoria contínua como uma ferramenta eficaz para ambientes com baixos níveis de automação. Além disso, é relevante notar que os resultados foram obtidos através de uma simulação; Portanto, em condições reais, com o apoio de ações complementares, como treinamento, supervisão ativa e uso de checklists, o impacto positivo poderia ser ainda maior.

### 3.7.- Proposta de melhoria para a área de montagem

**Padronização do trabalho através de Instruções Visuais**  
Em ambientes de fabricação manual, a padronização visual é uma ferramenta crítica para garantir a uniformidade do trabalho e reduzir a variabilidade operacional. A ausência de instruções claras aumenta a probabilidade de erros, especialmente quando o pessoal não tem formação técnica formal. A implementação de ajudas visuais permite estruturar as atividades-chave do processo de montagem, facilitando a compreensão de cada etapa, independentemente do nível educacional do operador.

- Desenho de planilhas visuais passo-a-passo com fotografias reais de cada fase de montagem.
- Instalação de painéis de instruções laminados em cada estação de trabalho.
- Utilização de cores ou codificação visual para a identificação de peças e ferramentas.

**Justificação:** Ajuda a reduzir erros de montagem e manuseamento, especialmente útil para trabalhadores sem formação técnica.

#### Formação técnica modular e contínua

Em ambientes de produção com alta dependência do trabalho manual, a melhoria da qualidade deve focar no desenvolvimento humano, no controle visual e na sistematização de boas práticas. Abaixo estão as principais estratégias que, sem a necessidade de automação, podem otimizar o desempenho operacional, reduzir erros e promover uma cultura de melhoria contínua.

#### 1. Formação permanente e focalizada

A formação contínua é essencial para elevar a competência técnica do pessoal operacional. Assim, propõe-se a implementação de micro-formação modular e breve que seja diretamente aplicável ao local de trabalho. Ao concentrar-se nos erros mais frequentes, as competências-chave são reforçadas, as reincidências são evitadas e uma cultura de qualidade é reforçada a partir da base operacional.

##### Ação proposta:

- Micro-treinamentos semanais 15-20 minutos antes do início do turno, com foco em:
  - Uso correto das ferramentas.
  - Boas práticas de manuseamento de materiais.
  - Técnicas de montagem seguras.

#### 2. Listas de verificação de autocontrole operacional

O uso de listas de verificação permite que os trabalhadores validem suas próprias atividades antes de liberar o produto, promovendo a detecção precoce de falhas e reduzindo a dependência de uma verificação final. Esta prática reforça a responsabilidade individual pela qualidade do trabalho realizado.

##### Ação proposta:

- Cada operador preenche uma lista de verificação simples no final da sua tarefa.
- Os supervisores validam aleatoriamente.
- Devem ser incluídas etapas críticas do processo, como o alinhamento das portas ou o binário dos elementos de fixação.

#### 3. Pontos de controle de qualidade em processo (PQCs)

A incorporação de pontos de verificação intermediários no fluxo de produção permite que os erros sejam contidos antes que avancem para fases em que a correção é mais

dispendiosa. Esta estratégia reduz significativamente o retrabalho e o desperdício, sendo especialmente eficaz em ambientes sem automação.

**Ação proposta:**

- Configure dois pontos de controle, por exemplo, após a submontagem e no final da montagem.
- As verificações serão realizadas por um operador rotativo previamente treinado.

**4. Reorganização do layout com abordagem ergonómica**

O layout físico do espaço de trabalho influencia diretamente a eficiência, a qualidade do produto e o bem-estar da equipe. Reorganizar o layout aplicando princípios ergonômicos reduz deslocamentos desnecessários, facilita o acesso às ferramentas e reduz a fadiga, o que tem um impacto positivo na redução de erros.

**Ação proposta:**

- Redesenhar a distribuição de ferramentas e peças para otimizar os movimentos.
- Incorpore mesas de trabalho ajustáveis ou suportes simples que facilitam a montagem.

**5. Sistema Andon Manual para Sinalização de Problemas**

Na ausência de tecnologia automatizada, o uso de pistas visuais simples permite que os operadores comuniquem desvios em tempo real. Esta solução acessível facilita a intervenção imediata em caso de falhas, melhora a comunicação da planta e reforça uma cultura proativa de resolução de problemas.

**Ação proposta:**

- Forneça aos operadores cartões visuais ou sinalizadores para relatar falhas ou interrupções.
- Acompanhe com um registo diário de incidentes.

**6. Rotação dos operadores por estações**

A rotação planeada entre estações permite diversificar competências, reduzir a monotonia e detetar mais claramente pontos críticos no processo. Além disso, ajuda a equilibrar a carga de trabalho e atribuir o pessoal mais experiente a tarefas mais complexas, reduzindo erros devido à superespecialização ou rotina.

**Ação proposta:**

- Implemente um sistema de rotação a cada 1 ou 2 semanas.
- Identifique as estações com a maior taxa de erro para redistribuir estrategicamente o pessoal.

**7. Reuniões Kaizen de Melhoria Contínua**

Reuniões curtas sob a abordagem Kaizen promovem a participação ativa da equipe na melhoria dos processos. Ao captar propostas a partir da experiência direta dos operadores, aumenta-se o seu sentimento de pertença e aproveita-se o conhecimento prático acumulado no chão de fábrica.

**Ação proposta:**

- Espaços semanais de 20 minutos para os trabalhadores proporem melhorias às suas estações.
- As ideias mais relevantes podem ser premiadas ou implementadas como um teste-piloto.

**4. Discussão****4.1 Interpretação dos resultados**

Os resultados obtidos mostram que a implementação de estratégias de melhoria contínua, adaptadas a um ambiente de montagem manual sem automação, pode gerar reduções significativas na taxa de defeitos. A simulação de reduções progressivas de erros mostrou uma diminuição acumulada de 47,3% nos produtos rejeitados no final do período analisado. Este achado apoia a hipótese de que intervenções estruturadas, como padronização do trabalho, treinamento contínuo e implementação de ferramentas visuais, podem melhorar substancialmente a qualidade em processos manuais.

**4.2 Comparação com estudos anteriores**

Os resultados deste estudo são consistentes com pesquisas anteriores que destacam a eficácia das instruções visuais na redução de erros em montagens manuais. Por exemplo, um estudo conduzido por Torkashvand mostrou que instruções visuais perceptivamente envolventes podem diminuir a carga cognitiva e melhorar o desempenho do operador em tarefas complexas de montagem. Além disso, a implementação de eventos Kaizen tem sido eficaz na melhoria da eficiência e redução de defeitos nas linhas de montagem, como evidenciado no caso de uma empresa indiana que conseguiu reduzir sua taxa de defeitos em 32% aplicando estratégias Lean-Kaizen.[29][30]

**4.3 Implicações teóricas e práticas**

Do ponto de vista teórico, este estudo contribui para o corpo de conhecimento sobre gestão da qualidade em ambientes de fabricação manual, destacando a importância de abordagens adaptativas e centradas no ser humano. Na prática, os resultados sugerem que as empresas que operam em contextos semelhantes podem beneficiar da adoção de estratégias de melhoria contínua, mesmo sem recorrer à automação. A implementação de ferramentas como listas de verificação, pontos de controle de qualidade em processo e sistemas de sinalização manual pode ser particularmente eficaz na redução de defeitos e na melhoria da eficiência operacional.[31]

**4.4 Limitações e recomendações**

Uma limitação deste estudo é que ele se baseia em dados históricos e simulações, que podem não capturar totalmente a dinâmica de um ambiente de produção em tempo real. Além disso, a ausência de um grupo controle limita a capacidade de atribuir causalidade direta às intervenções propostas. Recomenda-se que pesquisas futuras incluam estudos de campo com desenhos experimentais mais robustos, bem como a avaliação do impacto dessas

estratégias em diferentes contextos industriais e culturais.[32]

### 5. Conclusões.

O presente estudo mostrou que é possível alcançar melhorias significativas na qualidade do processo de montagem em ambientes de fabricação manual, através da aplicação de estratégias não automatizadas de melhoria contínua. Através da análise de dados históricos e da simulação de cenários de redução progressiva de defeitos, evidenciou-se uma diminuição de 3,25% na produção rejeitada, o que representa uma melhoria mensurável na eficiência e desempenho do sistema. Os resultados confirmam que intervenções como padronização visual, implementação de listas de verificação, treinamento contínuo e uso de pontos de controle de qualidade podem ser eficazes mesmo sem suporte tecnológico avançado.

A pesquisa traz para o campo da engenharia de produção uma perspectiva prática sobre como adaptar os princípios do pensamento Lean e ferramentas de gestão da qualidade para plantas com processos manuais, sem automação ou suporte de TI. Ao focalizar a redução sistemática de defeitos por meio de ações de baixo custo, este estudo preenche uma lacuna na literatura, que tende a se concentrar em contextos altamente técnicos. Isto fornece um quadro metodológico replicável, aplicável a indústrias que operam em condições semelhantes nos países em desenvolvimento.

Do ponto de vista prático, os resultados obtidos têm implicações diretas para a gestão de operações em empresas de manufatura leve, especialmente aquelas que enfrentam restrições estruturais para o investimento em automação. As estratégias propostas podem ser implementadas de forma progressiva e flexível, permitindo uma melhoria sustentada dos indicadores de qualidade sem a necessidade de alterar drasticamente o modelo de produção. A nível teórico, os resultados reforçam a validade de abordagens Lean adaptadas e sublinham a importância do fator humano como agente de transformação nos processos de produção manual.

Como recomendação para pesquisas futuras, sugere-se a validação dos resultados através de estudos de campo com desenhos quase-experimentais, incorporando a medição do impacto de cada intervenção separadamente. Também seria pertinente explorar o efeito dessas estratégias em outras indústrias com características semelhantes, ampliando assim o alcance e a generalizabilidade dos resultados. Por fim, propõe-se analisar em profundidade os aspectos organizacionais e culturais que condicionam a sustentabilidade de melhorias em ambientes com alta dependência do trabalho humano.

### 6.- Contribuições do Autor (Taxonomia de Papéis de Colaborador (CRediT))

1. Conceptualização: Jayling Selena Fu-Lopez
2. Curadoria de dados: Jayling Selena Fu-Lopez

3. Análise formal: Francisco Javier Duque-Aldaz
4. Aquisição de fundos: N/A.
5. Investigação: Jaime Patricio Fierro Aguilar
6. Metodologia: Fernando Raúl Rodríguez Flores
7. Gestão de Projetos: N/A
8. Recursos: N/A
9. Software: Francisco Javier Duque-Aldaz
10. Supervisão: Jaime Patricio Fierro Aguilar
11. Validação: Fernando Raúl Rodríguez Flores
12. Visualização: Jayling Selena Fu-Lopez
13. Redação - rascunho original: Jaime Patricio Fierro Aguilar
14. Redação - revisão e edição: Jayling Selena Fu-Lopez

### 7.- Referências.

- [1] F. B. Alvarado-Chávez, "Melhoria dos Processos ERP's (Enterprise Resource Planning) com 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 e G. W. TOBAR FARÍAS, «Development of a Balanced Scorecard applied to a University in the area of Social Management of Knowledge», *Espacios*, vol. 40, nº 15, 2019.
- [3] D. A. Carreño Dueñas, L. F. Amaya González e E. T. Ruiz Orjuela, «Lean Manufacturing tools in the industries of Tundama», *Engenharia Industrial. Actualidad y Nuevas Tendencias*, vol. 6, nº 21, pp. 49-62, 2018.
- [4] M. García P, C. Quispe A. e L. Ráez G., «Continuous improvement of quality in processes», *Industrial Data*, vol. 6, nº 1, pp. 89-94, 2003.
- [5] R. Gonzales Lovón e J. Cevallos Ampuero, «Modelo de gestão com qualidade de processos e tecnologia para a melhoria do serviço através da aplicação de equações estruturais», *Dados Industriais*, vol. 25, nº 1, pp. 157-179, 2022.
- [6] L. D. Martin, S. E. Rampersad, D. K. Low e M. A. Reed, «Melhoria de processos na sala de operações através da aplicação da metodologia Lean da 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 e G. W. Tobar Farías, «Afetação do ruído ambiente às instituições de ensino; conjunto de ações da Participação Cidadã e Centros Educacionais», *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 e H. E. Cohen-Padilla, «Lean manufacturing: 5 s and TPM, tools for quality improvement. Caso da empresa metalúrgica em Cartagena, Colômbia», *Signos*, vol. 11, n.º 1, pp. 71-86, 2021.
- [9] J. Ortiz, J. Salas Bacalla e L. Huayanay Palma, "Management model for the application of Lean Manufacturing tools for the improvement of productivity in a flame-proof clothing manufacturing company in Lima - Peru", *Industrial Data*, vol. 25, n.º 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, «Avaliação e Proposta de um Sistema de Gestão Ambiental numa Plantação de Manga», *INQUIDE*, vol. 7, nº 1, p. 23-34, 2025.
- [11] A. V. Marín-Calderón, M. Valenzuela-Galván, G. Cuamea-Cruz e A. Brau-Ávila, "Application of the Lean Six Sigma methodology to reduce waste in a manufacturing unit of polystyrene modular



- panels", *Engineering, research and technology*, vol. 24, no. 1, p. e1984, 2023.
- [12] V. E. García Casas, F. J. Duque-Aldaz e M. Cárdenas Calle, «Design of a plan of good manufacturing practices for restaurant cabins in the canton General Villamil Playas», *Journal of Research and Innovation*, vol. 8, nº 4, p. 58-76, 2023.
- [13] E. Alexander Piñero, F. E. Vivas Vivas e L. K. Flores de Valga, «Programa 5S's para el mejora continuo de la calidad y la productividad en los trabajos», *Ingeniería Industrial. Actualidad y Nuevas Tendencias*, vol. 6, nº 20, pp. 99-110, 2018.
- [14] F. J. Figueiredo Lugo, "Aplicação da Filosofia Lean Manufacturing num Processo de Produção de Betão", *Engenharia Industrial. Actualidad y Nuevas Tendencias*, vol. 4, nº 15, pp. 7-24, 2015.
- [15] J. Martinez, "ENGENHARIA DE GESTÃO DA QUALIDADE DE PROCESSOS E MELHORIA CONTÍNUA APLICADA AOS SISTEMAS DE PRODUÇÃO DE ORGANIZAÇÕES EMPRESARIAIS COMPLEXAS", *Scientia. Revista de Pesquisa da Universidade do 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, nº 2, p. 41-48, 2024.
- [17] D. Febles Pérez, Y. Trujillo Casañola e A. Mendoza Garnache, «Oportunidades de melhoria no processo de garantia da qualidade do processo e do produto», *Revista Cubana de Ciencias Informáticas*, vol. 16, nº 1, pp. 46-61, 2022.
- [18] H. I. Ticona Gregorio, "Application of Lean Six Sigma to Improve the Breakdown Repair Sub-Process in Communications Links", *Dados Industriais*, Vol. 25, No. 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, nº 3, pp. 41-48, 2024.
- [20] F. J. Duque Aldaz, F. R. Rodríguez-Flores e J. Carmona Tapia, «Identificação de parâmetros em sistemas de equações diferenciais ordinárias através do uso de redes neurais artificiais», *Revista San Gregorio*, vol. 1, nº 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, nº 3, 2023.
- [22] O. L. Fajardo Cueva, "Reducing Plant Shutdowns by Applying Value Chain Mapping (VSM) and Rapid Changes (SMED) of the Lean Manufacturing Methodology", *Dados Industriais*, vol. 27, nº 1, pp. 25-39, 2024.
- [23] J. A. Farfán Jiménez, "A IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA AUTOMATIZADO REDUZ OS TEMPOS DE SERVIÇO NOS PROCESSOS APLICÁVEIS AO BALCÃO ÚNICO PARA O TURISMO NO MUNICÍPIO PROVINCIAL DE CALLAO", *Dados Industriais*, vol. 23, nº 2, 2020.
- [24] F. J. Duque-Aldaz, E. R. Haymacaña Moreno, L. A. Zapata Aspiazu y F. Carrasco Choque, «Prediction of moisture content in the caca drying process by simple linear regression.», *INQUIDE*, vol. 6, nº 2, pp. 20-30, 2024.
- [25] Y. Torres-Medina, "The analysis of human error in manufacturing: a key element to improve the quality of production", *UIS Engineering Journal*, vol. 19, nº 4, pp. 53-62, 2020.
- [26] N. Canahua Apaza, "Implementation of the TPM-Lean Manufacturing methodology to improve the overall equipment efficiency (OEE) in the production of spare parts in a metalworking company", *Dados Industriais*, vol. 24, nº 1, 2021.
- [27] F. Duque-Aldaz, E. Pazán Gómez, W. Villamagua Castillo e A. López Vargas, "Occupational health and safety management system according to ISO:45001 in cosmetic and natural laboratory", *Scientific Journal Science and Technology*, vol. 24, nº 41, 2024.
- [28] M. E. Uribe Macias, «Proposta para o processo de aplicação da administração estratégica para PME», *Pensamento & Gestão*, nº 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», *Ciências Aplicadas*, vol. 11, nº 2, p. 749, 2021.
- [30] A. Prashar, «Redesigning an assembly line through Lean-Kaizen: an Indian case», *The TQM Journal*, vol. 26, nº 5, pp. 475-498, 2014.
- [31] M. Alnasheet, «Melhoria de um processo de montagem manual utilizando Lean Six Sigma: um estudo de caso sobre uma cabine modular ferroviária na BFG International», *Alnasheet, Maryam (2023). Melhoria de um processo de montagem manual usando 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, nº 8, 1999.



## 8. Anexos (apenas se existirem)

**Tabela 1.- Distribuição Semanal de Defeitos no Processo de Montagem – Dados Originais**

Semana	Uso incorreto de ferramentas especializadas (unidades)	Falta de lubrificação nas peças móveis (unidades)	Erros na fiação elétrica (unidades)	Desalinhamento de portas e gavetas (unidades)	Componentes em falta na montagem final (unidades)	Soldas ou fixadores fracos (unidades)	Montagem incorreta de acessórios (unidades)	Defeitos devidos ao manuseamento inadequado de materiais (unidades)	Produção Total Rejeitada (unidades)
<b>Junho 1-7</b>	11	19	10	36	26	26	123	151	402
<b>Junho 8-15</b>	21	17	33	54	15	23	125	158	446
<b>Junho 16-22</b>	0	16	23	45	40	25	126	162	437
<b>Junho 23-30</b>	16	13	5	40	45	29	125	155	428
<b>julho 1-7</b>	4	19	24	45	27	22	116	150	407
<b>Julho 8-15</b>	27	20	25	0	20	28	127	156	403
<b>Julho 16-22</b>	27	14	29	65	29	24	113	120	421
<b>Julho 23-30</b>	20	15	20	38	40	118	131	163	545
<b>Agosto 1-7</b>	23	15	24	0	45	15	109	143	374
<b>Agosto 8-15</b>	21	13	28	65	114	15	170	188	614
<b>Agosto 16-22</b>	21	13	25	6	27	0	117	145	354
<b>Agosto 23-30</b>	0	19	25	18	20	13	149	184	428
<b>1 a 7 de setembro</b>	0	14	30	19	21	0	142	159	385
<b>Setembro 8-15</b>	55	12	20	0	15	0	124	143	369
<b>16 a 22 de setembro</b>	14	19	30	40	29	0	134	166	432
<b>Setembro 23-30</b>	16	17	29	23	22	265	126	143	641
<b>Outubro 1-7</b>	19	14	27	28	21	132	170	182	593
<b>Outubro 8-15</b>	19	16	25	21	26	0	140	169	416
<b>Outubro 16-22</b>	20	19	22	23	21	0	141	170	416
<b>Outubro 23-30</b>	14	150	20	20	30	0	164	182	580
<b>Total de erros por critério</b>	348	454	474	586	633	735	2672	3189	9091

**Tabela 2.- Distribuição Semanal de Defeitos com Aplicação de Melhoria Progressiva.**

Redução da percentagem de erro	Semana	Uso incorreto de ferramentas especializadas (unidades)	Falta de lubrificação nas peças móveis (unidades)	Erros na fiação elétrica (unidades)	Desalinhamento de portas e gavetas (unidades)	Componentes em falta na montagem final (unidades)	Soldas ou fixadores fracos (unidades)	Montagem incorreta de acessórios (unidades)	Defeitos devidos ao manuseamento inadequado de materiais (unidades)	Produção Total Rejeitada (unidades)
<b>1.5 %</b>	<b>Junho 1-7</b>	10	18	9	35	25	25	121	148	391
<b>1.5 %</b>	<b>Junho 8-15</b>	20	16	32	53	14	22	123	155	435
<b>1.5 %</b>	<b>Junho 16-22</b>	0	15	22	44	39	24	124	159	427
<b>1.5 %</b>	<b>Junho 23-30</b>	15	12	4	39	44	28	123	152	417
<b>2 %</b>	<b>julho 1-7</b>	3	18	23	44	26	21	113	147	395
<b>2 %</b>	<b>Julho 8-15</b>	26	19	24	0	19	27	124	152	391
<b>2 %</b>	<b>Julho 16-22</b>	26	13	28	63	28	23	110	117	408



2 %	<b>Julho 23-30</b>	19	14	19	37	39	115	128	159	530
2 %	<b>Agosto 1-7</b>	22	14	23	0	44	14	106	140	363
2 %	<b>Agosto 8-15</b>	20	12	27	63	111	14	166	184	597
2 %	<b>Agosto 16-22</b>	20	12	24	5	26	0	114	142	343
2 %	<b>Agosto 23-30</b>	0	18	24	17	19	12	146	180	416
3 %	<b>1 a 7 de setembro</b>	0	13	29	18	20	0	137	154	371
3 %	<b>Setembro 8-15</b>	53	11	19	0	14	0	120	138	355
3 %	<b>16 a 22 de setembro</b>	13	18	29	38	28	0	129	161	416
3 %	<b>Setembro 23-30</b>	15	16	28	22	21	257	122	138	619
3 %	<b>Outubro 1-7</b>	18	13	26	27	20	128	164	176	572
4 %	<b>Outubro 8-15</b>	18	15	24	20	25	0	135	163	400
4 %	<b>Outubro 16-22</b>	19	18	21	22	20	0	136	164	400
4 %	<b>Outubro 23-30</b>	13	145	19	19	29	0	159	176	560
	<b>Total de erros por critério</b>	330	430	454	566	611	710	2600	3105	8806

**Tabela 3.- Análise da Frequência de Defeito no Processo de Montagem – Dados Originais.**

Defeitos	Frequência relativa	Frequência absoluta cumulativa	Frequência relativa	Frequência relativa cumulativa
Manuseamento inadequado de materiais (unidades)	3189	3189	35,08%	35%
Montagem incorreta de acessórios (unidades)	2672	5861	29,39%	64%
Soldas ou fixadores fracos (unidades)	735	6596	8,08%	73%
Componentes em falta na montagem final (unidades)	633	7229	6,96%	80%
Desalinhamento de portas e gavetas (unidades)	586	7815	6,45%	86%
Erros na fiação elétrica (unidades)	474	8289	5,21%	91%
Falta de lubrificação nas peças móveis (unidades)	454	8743	4,99%	96%
Uso incorreto de ferramentas especializadas (unidades)	348	9091	3,83%	100%

**Tabela 4.- Análise de Frequência de Defeitos com Redução Progressiva.**

Defeitos	Frequência relativa	Frequência absoluta cumulativa	Frequência relativa	Frequência relativa cumulativa
Manuseamento inadequado de materiais (unidades)	3101	3101	35,26%	35%
Montagem incorreta de acessórios (unidades)	2596	5697	29,52%	65%
Soldas ou fixadores fracos (unidades)	710	6407	8,07%	73%
Componentes em falta na montagem final (unidades)	609	7016	6,92%	80%
Desalinhamento de portas e gavetas (unidades)	566	7582	6,44%	86%
Erros na fiação elétrica (unidades)	454	8036	5,16%	91%
Falta de lubrificação nas peças móveis (unidades)	429	8465	4,88%	96%
Uso incorreto de ferramentas especializadas (unidades)	330	8795	3,75%	100%

**Tabela 5.- Indicadores Semanais de Desempenho Produtivo no Processo de Montagem – Dados Originais.**



Semana	Produção Total Rejeitada (unidades)	Produção aceite (unidades)	Produção Total (unidades)	Taxa de Rejeição da Produção = Produção Rejeitada / Produção Total (%)	Taxa de aceitação da produção = produção aceite / produção total (%)	Taxa de aceitação = produção aceite / produção rejeitada	Taxa de rejeição = produção rejeitada/produção aceite
<b>Junho 1-7</b>	402	5771	6173	6,5%	93,5%	14,36	0,07
<b>Junho 8-15</b>	446	5650	6096	7,3%	92,7%	12,67	0,08
<b>Junho 16-22</b>	437	7336	7773	5,6%	94,4%	16,79	0,06
<b>Junho 23-30</b>	428	5308	5736	7,5%	92,5%	12,40	0,08
<b>júlio 1-7</b>	407	3827	4234	9,6%	90,4%	9,40	0,11
<b>Julho 8-15</b>	403	2595	2998	13,4%	86,6%	6,44	0,16
<b>Julho 16-22</b>	421	3314	3735	11,3%	88,7%	7,87	0,13
<b>Julho 23-30</b>	545	4493	5038	10,8%	89,2%	8,24	0,12
<b>Agosto 1-7</b>	374	1984	2358	15,9%	84,1%	5,30	0,19
<b>Agosto 8-15</b>	614	4732	5346	11,5%	88,5%	7,71	0,13
<b>Agosto 16-22</b>	354	7294	7648	4,6%	95,4%	20,60	0,05
<b>Agosto 23-30</b>	428	7660	8088	5,3%	94,7%	17,90	0,06
<b>1 a 7 de setembro</b>	385	3814	4199	9,2%	90,8%	9,91	0,10
<b>Setembro 8-15</b>	369	7703	8072	4,6%	95,4%	20,88	0,05
<b>16 a 22 de setembro</b>	432	7165	7597	5,7%	94,3%	16,59	0,06
<b>Setembro 23-30</b>	641	4903	5544	11,6%	88,4%	7,65	0,13
<b>Outubro 1-7</b>	593	5087	5680	10,4%	89,6%	8,58	0,12
<b>Outubro 8-15</b>	416	5781	6197	6,7%	93,3%	13,90	0,07
<b>Outubro 16-22</b>	416	2789	3205	13,0%	87,0%	6,70	0,15
<b>Outubro 23-30</b>	580	6714	7294	8,0%	92,0%	11,58	0,09
<b>Total de erros por critério</b>	<b>9091</b>	<b>103920</b>	<b>113011</b>				

**Tabela 6.- Indicadores Semanais de Desempenho Produtivo com Melhoria Progressiva no Controle de Defeitos.**

Redução da percentage m de erro	Semana	Produção Total Rejeitada (unidades)	Produção aceite (unidades)	Produção Total (unidades)	Taxa de Rejeição da Produção = Produção Rejeitada / Produção Total (%)	Taxa de aceitação da produção = produção aceite / produção total (%)	Taxa de aceitação = produção aceite / produção rejeitada	Taxa de rejeição = produção rejeitada/produção aceite
1,5 %	<b>Junho 1-7</b>	391	5782	6173	6,3%	93,7%	14,79	0,07
1,5 %	<b>Junho 8-15</b>	435	5661	6096	7,1%	92,9%	13,01	0,08
1,5 %	<b>Junho 16-22</b>	427	7346	7773	5,5%	94,5%	17,20	0,06
1,5 %	<b>Junho 23-30</b>	417	5319	5736	7,3%	92,7%	12,76	0,08
2 %	<b>júlio 1-7</b>	395	3839	4234	9,3%	90,7%	9,72	0,10
2 %	<b>Julho 8-15</b>	391	2607	2998	13,0%	87,0%	6,67	0,15
2 %	<b>Julho 16-22</b>	408	3327	3735	10,9%	89,1%	8,15	0,12
2 %	<b>Julho 23-30</b>	530	4508	5038	10,5%	89,5%	8,51	0,12
2 %	<b>Agosto 1-7</b>	363	1995	2358	15,4%	84,6%	5,50	0,18
2 %	<b>Agosto 8-15</b>	597	4749	5346	11,2%	88,8%	7,95	0,13



<b>2 %</b>	<b>Agosto 16-22</b>	343	7305	7648	4,5%	95,5%	21,30	0,05
<b>2 %</b>	<b>Agosto 23-30</b>	416	7672	8088	5,1%	94,9%	18,44	0,05
<b>3 %</b>	<b>1 a 7 de setembro</b>	371	3828	4199	8,8%	91,2%	10,32	0,10
<b>3 %</b>	<b>Setembro 8-15</b>	355	7717	8072	4,4%	95,6%	21,74	0,05
<b>3 %</b>	<b>16 a 22 de setembro</b>	416	7181	7597	5,5%	94,5%	17,26	0,06
<b>3 %</b>	<b>Setembro 23-30</b>	619	4925	5544	11,2%	88,8%	7,96	0,13
<b>3 %</b>	<b>Outubro 1-7</b>	572	5108	5680	10,1%	89,9%	8,93	0,11
<b>4 %</b>	<b>Outubro 8-15</b>	397	5800	6197	6,4%	93,6%	14,61	0,07
<b>4 %</b>	<b>Outubro 16-22</b>	398	2807	3205	12,4%	87,6%	7,05	0,14
<b>4 %</b>	<b>Outubro 23-30</b>	554	6740	7294	7,6%	92,4%	12,17	0,08
<b>Total de erros por critério</b>		<b>8795</b>	<b>104216</b>	<b>113011</b>				



## Orientações para publicação na revista INQUIDE – Engenharia Química e Desenvolvimento

### 1. Informações gerais

INQUIDE – Engenharia Química e Desenvolvimento é uma revista científica multidisciplinar editada pela Faculdade de Engenharia Química da Universidade de Guayaquil, localizada em Guayaquil, Equador. Publicada desde janeiro de 2015, a revista tem uma periodicidade semestral e centra-se em contribuições originais na área da ciência e engenharia.

O INQUIDE é um periódico revisado por pares que usa um sistema de revisão externa revisado por pares, sob a metodologia de revisão duplamente cega, segundo os padrões de publicação do Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). Este sistema garante um processo de revisão objetivo, imparcial e transparente, o que facilita a inclusão da revista em bases de dados, repositórios e índices de referência internacionais.

Atualmente, o INQUIDE está indexado em:

- 1.- Latindex Catalog 2.0 (Sistema Regional de Informação Online para Revistas Científicas da América Latina, Caribe, Espanha e Portugal).
- 2.- Dialnet (Fundação Dialnet, Universidade de La Rioja).
- 3.- Rede de Editores e Revistas Científicas do Equador (RERCIE).
- 4.- Crossref, com atribuição de DOI (Digital Object Identifier) para cada artigo publicado.

A revista é publicada em formato eletrônico (e-ISSN: 3028-8533) e aceita manuscritos em espanhol, inglês e português, promovendo a divulgação de pesquisas de alta qualidade em nível internacional.

### 2. Âmbito de aplicação e política

#### 2.1. Tema

A INQUIDE – Engenharia Química e Desenvolvimento publica contributos originais na área da ciência e engenharia, com uma abordagem multidisciplinar. São aceites trabalhos de investigação realizados por autores nacionais e internacionais, desde que cumpram os critérios de qualidade científica exigidos.

#### 2.2. Tipos de contribuições

A revista prioriza a publicação de:

- Artigos de pesquisa empírica que apresentam resultados originais e significativos.
- Relatórios de desenvolvimento tecnológico descrevendo inovações ou aplicações práticas em engenharia e ciência.
- Propostas de modelos e soluções inovadoras que contribuam para o avanço do conhecimento.
- Revisões de última geração que sintetizam e analisam criticamente o conhecimento atual em uma área específica.

- Artigos dissertativos que apresentem reflexões teóricas ou metodológicas relevantes para a área.

#### 2.3. Requisitos de originalidade

A INQUIDE apenas publica trabalhos originais e inéditos escritos em espanhol, inglês ou português. Os manuscritos não devem ter sido previamente publicados em qualquer meio impresso ou eletrônico, nem estar em processo de arbitragem ou publicação em outra revista.

#### 2.4. Processo de arbitragem

Todos os artigos submetidos serão submetidos a um rigoroso processo de revisão por pares sob a metodologia double-blind review. A avaliação baseia-se em critérios de:

- Originalidade: A obra deve apresentar novas contribuições para o campo.
- Relevância: O tema deve ser relevante para as áreas de ciência e engenharia.
- Atualidade: O estudo deve basear-se na literatura recente e abordar questões contemporâneas.
- Rigor científico: A metodologia e os resultados devem ser sólidos e bem fundamentados.
- Conformidade com as normas editoriais: O manuscrito deve seguir as diretrizes de formato e estilo da revista.

A receção de um manuscrito não implica um compromisso de publicação. A decisão final de publicação será tomada pelo Conselho Editorial, com base nas recomendações dos revisores especializados.

#### 2.5. Documentos Necessários

Os autores devem submeter os seguintes documentos juntamente com o seu manuscrito:

1. Lista de verificação: Disponível para download em <https://1drv.ms/w/c/7bce1d25160b4657/EdRL-JU4fBVBqSt1GD7t1N8BZVFXYapjNxM8ji3Fa9LFhA?e=Z7OqeO>.
2. Apresentação e cessão de direitos: Disponível para download em <https://1drv.ms/w/c/7bce1d25160b4657/EZYnPTveWCtKgV5aNNZ1icQBdaFzvOYKCLwlhD7GC76hzg?e=ldbXMf>.

#### 2.6. Submissão de artigos

Os artigos devem ser submetidos através do Open Journal System (OJS) da revista, disponível em:

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

Além disso, os autores podem enviar consultas ou documentos complementares para o e-mail:

[inuide@ug.edu.ec](mailto:inuide@ug.edu.ec) ou [francisco.duquea@ug.edu.ec](mailto:francisco.duquea@ug.edu.ec).

### 3. Apresentação e estrutura dos manuscritos

Todos os manuscritos submetidos ao INQUIDE devem seguir o formato estabelecido pela revista. As regras e requisitos para a apresentação e estrutura dos artigos estão detalhados abaixo:

#### 3.1. Formato do manuscrito

- Os manuscritos devem ser escritos em Microsoft Word (formato.doc ou .docx).
- O modelo oficial da revista pode ser descarregado em: <https://1drv.ms/w/c/7bce1d25160b4657/EXSf2GX2M>



[uJEn-hf5qwsswUBzx4-1vYE\\_6qKE8ba2UF62g?e=68U2h9](https://1drv.ms/w/c/7bce1d25160b4657/EdRL-1vYE_6qKE8ba2UF62g?e=68U2h9).

- O documento deve estar em coluna dupla, com as seguintes margens: Topo: 3,5 cm, Fundo: 3,5 cm, Esquerda: 1,5 cm, Direita: 1,5 cm
- Use fonte Times New Roman, tamanho 10, justificada, com espaçamento entre linhas simples e espaçamento 0.

### 3.2. Estrutura do manuscrito

#### 3.2.1. Apresentação e carta de apresentação

1. Título (espanhol) / Title (inglês):
  - Deve ser conciso mas informativo, com um máximo de 20 palavras.
  - Se o artigo for escrito em espanhol, o título em inglês deve aparecer na segunda linha e vice-versa.
2. Autores e afiliação:
  - Inclua os nomes completos e apelidos de todos os autores, por ordem de preferência.
  - Especificar a afiliação institucional de cada autor, incluindo: Dependência e instituição; Email institucional; ORCID; Cidade e país.
  - Nota: Um máximo de 40% dos autores podem ser afiliados à Universidade de Guayaquil.
3. Resumo (Espanhol) / Resumo (Inglês):
  - Comprimento máximo de 250 palavras em ambas as línguas.
  - Deve incluir:
    1. Justificação do tema.
    2. Objetivos.
    3. Metodologia e amostra.
    4. Principais resultados.
    5. Principais conclusões.
4. Palavras clave (español) / Palavras-chave (inglês):
  - Forneça um máximo de 7 palavras-chave em cada língua, diretamente relacionadas com o tópico do trabalho.
  - Recomenda-se o uso de termos do Thesaurus da UNESCO.
5. Carta de Apresentação:
  - Inclua uma declaração certificando que o manuscrito é uma contribuição original, não submetida ou em revisão em outra revista.
  - Confirmar a autoria e aceitação de alterações formais de acordo com os padrões da revista.
  - Transfira o formato da carta de apresentação a partir de:

[https://1drv.ms/w/c/7bce1d25160b4657/EdRL-1vYE\\_6qKE8ba2UF62g?e=68U2h9](https://1drv.ms/w/c/7bce1d25160b4657/EdRL-1vYE_6qKE8ba2UF62g?e=68U2h9)  
<https://1drv.ms/w/c/7bce1d25160b4657/EZYnPTveWCtKgV5aNNZ1icQBdaFzvOYKCLwlhD7GC76hzg?e=ldbXMf>

#### 3.2.2. Estrutura do manuscrito

1. Introdução:

- Apresentar o problema de investigação, o contexto, a fundamentação e os objetivos do estudo.
  - Incluir uma revisão da literatura mais relevante e atual, tanto a nível nacional como internacional.
2. Materiais e métodos:
    - Descrever a metodologia, os materiais, o desenho experimental e os procedimentos de forma clara e detalhada.
    - Se for utilizada uma metodologia original, explique a sua lógica e possíveis limitações.
  3. Resultados:
    - Apresente os resultados de forma clara e organizada, utilizando tabelas, gráficos e figuras quando necessário.
    - Evite a duplicação de dados entre texto e tabelas/figuras.
  4. Discussão:
    - Interpretar os resultados, relacionando-os com os objetivos do estudo e com a literatura existente.
    - Discutir as implicações teóricas e práticas dos resultados.
  5. Conclusões:
    - Resuma os resultados mais importantes do estudo.
    - Destacar as contribuições do trabalho e propor futuras linhas de pesquisa.
  6. Agradecimentos (opcional):
    - Reconhecer fontes de financiamento, colaboradores ou instituições que apoiaram a pesquisa.
  7. Referências:
    - Siga o estilo IEEE para citações e a lista de referências.
    - Use o gerenciador de referência do Microsoft Word para gerenciar citações.
    - Certifique-se de que todas as referências são citadas no texto e vice-versa.

#### 3.3. Figuras, quadros e equações

- Figuras e quadros:
  - Devem ser numerados consecutivamente (Fig. 1, Tabela 1, etc.) e citados no texto.
  - Os números devem ter uma resolução mínima de 300 dpi e estar em formato JPG, PNG.
  - As tabelas devem ter um título acima e figuras um título abaixo.
- Equações:
  - Use o editor de equações do Microsoft Word.
  - Numere as equações consecutivamente, colocando o número entre parênteses e alinhado à esquerda.

#### 3.4. Submissão do manuscrito

- Os artigos devem ser submetidos através do Open Journal System (OJS) da revista:  
<https://revistas.ug.edu.ec/index.php/iqd/information/authors>
- Certifique-se de carregar:
  - O manuscrito em formato Word (.doc ou .docx).
  - Os números em arquivos separados, com a resolução e formato adequados.



- A Carta de Apresentação e outros documentos necessários.

#### 4. Processo de Submissão

A submissão de manuscritos ao INQUIDE deve ser realizada seguindo os seguintes passos e requisitos:

##### 4.1. Plataforma de envio

- Todos os artigos devem ser submetidos através do Open Journal System (OJS) da revista, disponível em: <https://revistas.ug.edu.ec/index.php/iqd/information/authors>.
- Os autores devem registrar-se na plataforma OJS antes da submissão.

##### 4.2. Documentos Necessários

No momento da submissão, os autores deverão fazer o upload dos seguintes documentos:

1. Manuscrito em formato Word (.doc ou .docx):
  - O artigo deve seguir o formato e a estrutura estabelecidos pela revista (ver secção 3).
  - Inclua dados completos do autor e sua afiliação institucional.
2. Figuras e quadros:
  - Os valores devem ser enviados em ficheiros separados, em formato JPG, PNG, com uma resolução mínima de 300 dpi.
  - As tabelas devem ser incluídas no manuscrito, seguindo o formato indicado na secção 3.
3. Carta de Apresentação:
  - Inclua uma declaração certificando que o manuscrito é uma contribuição original, não submetida ou em revisão em outra revista.
  - Confirmar a autoria e aceitação de alterações formais de acordo com os padrões da revista.

Descarregue o formato de Cover Letter desde: <https://1drv.ms/w/c/7bce1d25160b4657/EZYnPTveWCtKgV5aNZ1icQBdaFzvOYKCLwlhD7GC76hzg?e=ldbXMf>

##### 4.3. Lista de verificação:

- Certifique-se de que o manuscrito cumpre todos os requisitos técnicos e de formatação.

Faça o download da lista de verificação em: <https://1drv.ms/w/c/7bce1d25160b4657/EdRL-JU4fBVBoSt1GD7t1N8BZVFXYapjNxM8ji3Fa9LFhA?e=Z7OqeO>

##### 4.3. Gestor de correspondência

- Um dos autores deve ser designado como **responsável pela correspondência**.
- Este autor será o principal ponto de contacto para todas as comunicações relacionadas com o manuscrito.

##### 4.4. Confirmação de receção

- Uma vez submetido o artigo, o sistema OJS enviará automaticamente um e-mail de confirmação ao autor correspondente.

##### 4.5. Consultas e Suporte

- Para questões sobre o processo de submissão ou problemas técnicos, os autores podem contactar a equipa editorial através dos seguintes e-mails:

- [inquide@ug.edu.ec](mailto:inquide@ug.edu.ec)
- [francisco.duquea@ug.edu.ec](mailto:francisco.duquea@ug.edu.ec)

#### 5. Processo Editorial

O processo editorial da INQUIDE visa garantir a qualidade, originalidade e rigor científico dos manuscritos publicados. O processo é descrito passo a passo abaixo:

##### 5.1. Revisão inicial

Uma vez recebido o manuscrito, a equipa editorial realiza uma revisão inicial para verificar os seguintes aspetos:

1. Tema: O manuscrito deve estar dentro do âmbito temático da revista (ciência e engenharia).
2. Formato e estrutura: O manuscrito deve seguir o formato e a estrutura estabelecidos pela revista (ver secção 3).
3. Citações e referências: Todas as referências bibliográficas devem ser corretamente citadas no texto, seguindo o estilo IEEE.
4. Originalidade: O manuscrito será submetido a uma verificação de plágio utilizando software especializado. É aceite um máximo de 15% de semelhança com outros trabalhos.

Caso o manuscrito não cumpra algum destes requisitos, será solicitado ao autor que faça as correções necessárias antes de prosseguir com o processo de avaliação.

##### 5.2. Análise pelos pares

Os manuscritos que passarem na revisão inicial serão submetidos a um rigoroso processo de revisão por pares sob a metodologia de revisão duplamente cega. Este processo inclui as seguintes etapas:

1. Atribuição dos revisores:
  - O editor designará pelo menos dois revisores especializados na área temática do manuscrito.
  - Os revisores podem ser especialistas nacionais ou internacionais.
2. Avaliação:
  - Os revisores avaliarão o manuscrito com base em critérios como originalidade, relevância, rigor científico, clareza e contribuição para o campo.
  - Cada examinador emitirá um relatório com um dos seguintes resultados:
    - Publicável sem alterações.
    - Publicável com alterações sugeridas.
    - Publicável com alterações obrigatórias.
    - Não publicável.
3. Decisão editorial:
  - O editor analisará os relatórios dos revisores e tomará uma decisão final sobre a aceitação ou rejeição do manuscrito.
  - Se o manuscrito for aceite, o autor será notificado para fazer as alterações sugeridas (se aplicável).
  - Se o manuscrito for rejeitado, o autor será notificado e o artigo será arquivado.

##### 5.3. Tempo de revisão

- O processo de revisão por pares dura um mínimo de 4 semanas.



- No final deste período, o autor será notificado do resultado da avaliação e das recomendações dos revisores.

#### 5.4. Correções e versão final

- Caso o manuscrito seja aceito com alterações, o autor deverá enviar a versão corrigida dentro do prazo estabelecido pelo editor.
- A equipa editorial verificará se as correções solicitadas foram corretamente incorporadas antes de prosseguir com a publicação.

#### 5.5. Publicação

- Os manuscritos aceitos serão publicados nas edições semestrais da revista (janeiro e julho).
- Os autores receberão uma notificação assim que o seu trabalho estiver disponível na plataforma da revista.

### 6. Publicação

A INQUIDE – Engenharia e Desenvolvimento Químico publica dois números por ano, nas seguintes datas:

- Primeira edição: 1 de janeiro.
- Segunda edição: 1 de julho.

#### 6.1. Prazos de envio

Para garantir que os manuscritos são considerados nas edições correspondentes, os autores devem ter em conta os seguintes prazos:

- Manuscritos para a edição de janeiro: Devem ser submetidos até 31 de outubro do ano anterior.
- Manuscritos para a edição de julho: Devem ser submetidos até 30 de abril do mesmo ano.

#### 6.2. Disponibilidade dos artigos

- Uma vez publicados, os artigos estarão disponíveis na plataforma eletrônica da revista, acessível através de: <https://revistas.ug.edu.ec/index.php/iqd>.
- Cada artigo publicado incluirá um DOI (Digital Object Identifier), que garante a sua identificação e acesso permanente.

#### 6.3. Política de Acesso Livre

INQUIDE é uma revista de acesso aberto, o que significa que todos os artigos estão disponíveis gratuitamente para leitura, download e distribuição, sob uma licença Creative Commons.

### 7. Informações sobre a utilização da inteligência artificial

A INQUIDE reconhece a importância de manter elevados padrões éticos na investigação científica, especialmente na utilização da Inteligência Artificial (IA). Assim, são estabelecidas as seguintes diretrizes:

#### 7.1. Utilização da IA na investigação

- Se a Inteligência Artificial tiver sido usada em qualquer etapa da pesquisa apresentada no manuscrito, os autores devem declarar isso explicitamente na Carta de Apresentação.
- Especifique as seções do manuscrito onde a IA foi usada, descrevendo sua função e escopo.

#### 7.2. Transparência e responsabilização

- Os autores são responsáveis por garantir que o uso da IA não comprometa a originalidade, integridade e rigor científico do trabalho.

- A equipe editorial avaliará a declaração de uso da IA e poderá solicitar informações adicionais, se necessário.

#### 7.3. Aceitar Manuscritos com IA

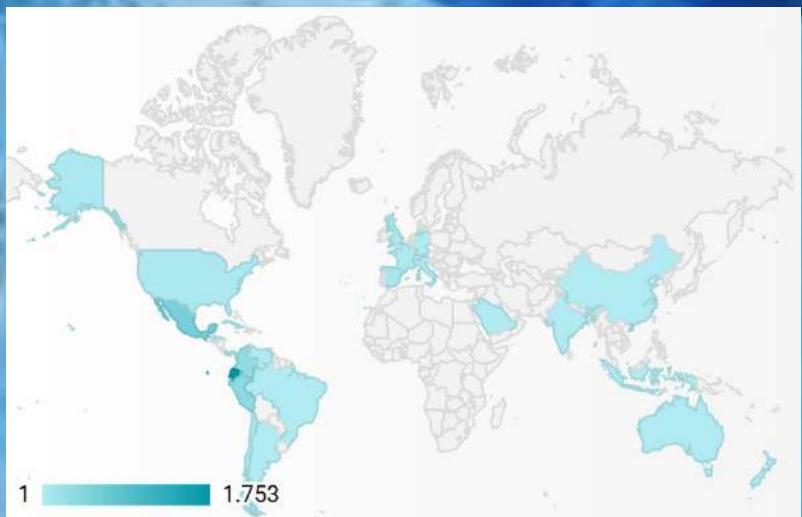
- A decisão final sobre a aceitação de manuscritos que tenham utilizado IA fica a critério do Conselho Editorial, com base na transparência e no cumprimento dos padrões éticos da revista.

# INQUIDE



Exploramos o desconhecido,  
resolvemos o impossível.  
Bem-vindo à fronteira do  
conhecimento.

Visitas por país.



## Artigos mais visitados.

### 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: thermobeaating, 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 Rupella albinella in rice cultivars ( <i>Oryza sativa</i> )	361
Gordillo Alvarado et al.	Study of Cauje ( <i>Pouteria caiimito</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 gastrodiplomacy as a strategic axis of tourism development and contribution to the cultural dissemination of Ecuador	274

### Contacto principal.

Francisco Javier Duque-Aldaz  
Universidade de Guayaquil  
Telefone +593 98 564 1201 WhatsApp  
Telefone +593 99 576 0762 Telegrama  
[francisco.duquea@ug.edu.ec](mailto:francisco.duquea@ug.edu.ec)  
[inquide@ug.edu.ec](mailto:inquide@ug.edu.ec)

Transforme a sua investigação num legado.  
Submeta o seu artigo e junte-se a uma comunidade científica de grande impacto.